

KAS DOMINA FIZIKUS ŠIANDIEN?

KAS DOMINA FIZIKUS ŠIANDIEN?



VILNIUS „MOKSLAS" 1984

TURINYS

Pratarmė 3

V. Ginzburgas. Po dešimties metų, arba pasakojimas apie kai kurias šių dienų fizikos problemas ir apie permainas, įvykusias šiame moksle per paskutinį dešimtmetį (Vertė *E. Juškienė*) 6

Retesniųjų fizikos terminų paaiškinimai (Sudarė *R. Karazija*) 46

J. Požela. Plazma ir karštieji elektronai puslaidininkiuose 49

A. Piskarskas. Lazeriai: pasiekimai, perspektyvos 57

E. Norvaišas. Ką mes žinome ir ko nežinome apie atomo branduolį .. 66

K. Makariūnas. Mikropasaulis per 20 metų 73

A. Matulis. Sinergetika, arba mokslas apie struktūrų susidarymą 84

Nobelio premijos už fizikos tyrimus laureatai (1965—1983) 91

PRATARMĖ

Fizikos mokslas primena dangoraižį, kurio viršutiniai aukštai vos įžiūrimi nuo kasdienybės — žemės. O kūrimo sparta nelėtėja — rūmas aukštinamas ir platinamas, senosios dalys modernizuojamos, ryškėja vis naujų aukštų ir priestatų kontūrai.

Fizikos dangoraižis įsirėžė į mūsų civilizacijos horizontą būtent šiame amžiuje, ir dabar jo nepastebėti, nesinaudoti jo teikiamais patogumais neįmanoma. Tad verta pamėginti suprasti fiziką.

Ekskursijon po atskirus to dangoraižio aukštus kviečia „Fizikos mokyklos" serijos knygutės. Betgi apie naujausius, įdomiausius atradimus parašoma ne taip jau greitai. Kol atradimas patenka į populiarių knygų puslapius, praeina keleri metai, net dešimtmetis. Greičiau pasirodo populiarūs straipsniai. Deja, jie būna išsisklaidę įvairiuose žurnaluose ir ne visiems prieinami. Norint pateikti išsamesnį naujosios fizikos vaizdą, 1975 m. buvo išleistas straipsnių rinkinys „Kas domina fizikus šiandien". Praėjo beveik dešimt metų, fizikai nesėdėjo rankas sudėję, tad vėl prisikaupė medžiagos panašiai knygutei sudaryti. Kadangi jos tikslas toks pat, kaip ir ankstesniosios, tai nesistengta sugalvoti naują pavadinimą.

Pirmojoje knygelėje buvo atspausdinta nedidelė ištrauka iš akad. V. Ginzburgo straipsnio „Kokios fizikos ir astrofizikos problemos atrodo dabar ypač svarbios ir įdomios". Tas žymaus tarybinio fiziko bandymas apžvelgti „iš paukščio skrydžio" naująją fiziką sukėlė didžiulį susidomėjimą ir gyvas diskusijas visame pasaulyje. Neseniai V. Ginzburgas dar kartą įrodė, kad jis — bene vienintelis — sugeba sekti visą fiziką: straipsnyje tuo pačiu pavadinimu, tik su paantrašte „Po dešimties metų" jis aprašė ryškesnius pakitimus, įvykusius fizikoje per tą laikotarpį. Deja, tas straipsnis, atspausdintas žurnale „Uspechi fizičeskich nauk", skirtas fizikams, betgi žurnale „Nauka i žiznj" pasirodė jo populiarus variantas. Jis ir pateikiamas šioje knygelėje. Net ir supopuliarintas V. Ginzburgo straipsnis nėra lengvai skaitomas, bet atkaklus skaitytojas patirs didelį malonumą, vedžiojamas po viršutinius fizikos dangoraižio aukštus vieno iš žymiausių jo architektų.

Savo straipsnyje V. Ginzburgas pabrėžia, kad, išskirdamas svarbiausias ir įdomiausias fizikos problemas, jis vadovavosi savo pomėgiais bei simpatijomis, taigi nepaminėjo daugelio svarbių klausimų. Mus ypač domina tos problemos, kurias sprendžia respublikos

fizikai. Tad knygelėje spausdinama dar penketas mūsų respublikos fizikų straipsnių, pratęsiančių ir praplečiančių V. Ginzburgo apžvalgą.

Viena iš pagrindinių fizikos mokslo Tarybų Lietuvoje krypčių — puslaidininkių fizika. Būtent joje padarytas pirmasis oficialiai užregistruotas mokslo atradimas mūsų respublikoje, gauta pirmoji Lietuvos mokslininkų Lenino premija, čia dirba didžiausias mūsų fizikų būrys. Ir atradimas, ir premija susiję su karštųjų elektronų arba plazmos puslaidininkiuose tyrimais, su jų vadovu LTSR MA prezidentu J. Požela. Savo straipsnyje jis išsamiai pasakoja apie įvairias karštųjų elektronų savybes, jų taikymus ir ateities perspektyvas.

Pastaruoju metu, kalbant apie respublikos fiziką, vis dažniau linksniuojamas žodis „lazeris". Vienas iš šios srities darbų pradininkų Lietuvoje, tiesa, dar jaunas, kaip ir pati kryptis,— VVU katedros vedėjas mokslų daktaras A. Piskarskas. Jo vadovaujama grupė kuria labai trumpų impulsų lazerius. Apie jų veikimo principus bei įdomias taikymo galimybes ir rašoma A. Piskarsko straipsnyje.

Dauguma respublikos fizikų teoretikų — akad. A. Jucio mokiniai arba jo mokinių mokiniai. Šios mokyklos įkūrėjas dirbo atomo teorijos srityje, bet jo skatinami teoretikai išplėtė darbus ir į molekulių, atomo branduolio, kietojo kūno sritis. Fiz.-mat. m. kand. E. Norvaišas — vienas iš jaunesniųjų teoretikų branduolininkų. Be to, jis yra respublikos fizikų draugijos mokslinis sekretorius. „Moksle ir gyvenime" skaitėme keletą jo įdomių straipsnių apie kvantinės mechanikos kūrėjus. Čia jis populiariai pasakoja, kas žinoma ir kas nežinoma apie atomo branduolį.

Respublikoje plėtojama ir eksperimentinė branduolio fizika. Fizikos instituto Radiologinėje laboratorijoje yra Radioaktyvaus spinduliavimo skyrius, kuriam jau daugiau kaip dvidešimt metų vadovauja fiz.-mat. m. kand. K. Makariūnas. Tirdamas įvairias radioaktyviųjų izotopų savybes, jis spėja sekti atradimus gretimose fizikos srityse, tad savo straipsnyje apžvelgia mikropasaulio sampratos raidą per pastaruosius 20 metų. Tai esminis elementariųjų dalelių fizikos etapas. Žinodamas jo istoriją, skaitytojas lengviau supras V. Ginzburgo apžvalgoje minimus naujausius pasiekimus ir problemas.

Mokslas ne tik skaidosi į vis specialesnes sritis, bet — skaitytojų ir pačių mokslininkų džiaugsmui — kartkartėmis vienijasi. Neseniai fizikos, chemijos, ir biologijos sandūroje atsirado naujas mokslas — sinergetika. Ji atskleidžia netikėtus bendrumus, būdingus gyvajai ir negyvajai gamtai. Apie šį mokslą įdomiai pasakoja

mokslų daktaras A. Matulis — vienas iš neramiausių ir aktyviausių mūsų teoretikų, pats bandantis jėgas aprašomojoje srityje.

Pateikiamas straipsnių rinkinys — tik šiuolaikinės fizikos mozaika, atspindinti autorių ir sudarytojo požiūrį. Tikėkimės, kad ją papildys ir pratęs kitos panašios knygutės. Juk du rinkiniai „Kas domina fizikus šiandien" — tai jau tradicijos pradžia.

R. Karazija

V. GINZBURGAS

PO DVIDEŠIMTIES METŲ,

arba pasakojimas apie kai kurias šių dienų fizikos problemas ir apie permainas, įvykusias šiame moksle per paskutinį dešimtmetį *

MAKROFIZIKA

Makrofizikos statinys remiasi į tvirtą pamatą — klasikinę ir kvantinę mechaniką, klasikinę ir *kvantinę elektrodinamiką* **, taip pat specialiąją reliatyvumo teoriją. Todėl dabar makrofizikos raida, suprantama, ne tokia sparti ir ne tokia dramatiška, kaip mikrofizikos ir astronomijos (turiu omenyje ir kosmogoniją). Makrofizikai čia priskiriama ir branduolio fizika, nors ji labai artima mikrofizikai. O štai bendroji reliatyvumo teorija, iš esmės priklausanti makrofizikai, visą savo galią parodo tik kosmose, todėl ir nagrinėjama „Astrofizikos" skyriuje. Tačiau netgi priskyrę makrofizikai branduolio fizikos ir bendrosios reliatyvumo teorijos pasiekimus, turėtume pripažinti, kad per paskutinį dešimtmetį gilių ir reikšmingų naujų žinių čia gauta mažiau negu mikrofizikoje. Beje, mokslo pasiekimų svarstyklėmis nepasversi, daugumą jų apskritai keblu palyginti. Todėl verčiau neskirstysime „vietų" ir pereisime prie konkrečių problemų.

1. Valdoma termobranduolinė sintezė

Ši problema sprendžiama jau 30 metų. Iš pradžių apėmęs netrikdomas optimizmas gan greitai išblėso, ir dalis mokslininkų nusiteikė net pesimistiškai: paaiškėjo, kokia kaprizinga karštoji plazma, kaip sunku ją išlaikyti spąstuose (tai — įrenginys, kuriame milijonų laipsnių temperatūros plazmą laiko „pakibusią" magnetinis laukas). Tačiau pamažu buvo įsitikinta, kad, palaikant tiksliai vienalytį lauką ir pašalinus iš vandenilio plazmos sunkesnes prie-

* Versta iš: «Наука и жизнь», 1982, Nr. 4—6. Lietuviškam leidimui autorius straipsnį papildė, kad atsispindėtų ir paskutiniųjų metų fizikos bei astrofizikos laimėjimai.

** Pakrypusiu šriftu išskirtieji žodžiai paaiškinti po straipsnio pridedamame žodynėlyje.

maišas, įvairūs magnetiniai spąstai — tokamakai, stelaratoriai ir kitokie — apskritai veikia taip, kaip ir buvo tikėtasi. Todėl dabar jau nekyla rimtų abejonių, jog galima pasiekti tikslą, tobulinant sistemas su magnetiniais plazmos spąstais. Tačiau, norint patikrinti skaičiavimų rezultatus ir išvengti tam tikrų kliūčių, tenka statyti vis didesnius įrenginius, o tam, suprantama, reikia daug lėšų, pastangų ir laiko. Šiandien tokamakai — vis dar favoritai [4], bet aš manau, kad kol kas dar nėra įrodyta, jog jie pranašesni, pavyzdžiui, už stelatorius. Toliau tyrinėjami ir „atvirieji" magnetiniai spąstai, juokais vadinami „kamščiatronais". Vargu ar kas guldytų galvą, kad atvirosios sistemos, tam tikra prasme paprasčiausios ir patogiausios, niekada neįstengs konkuruoti su *toroidiniais įrenginiais.*

Paskutinį dešimtmetį kur kas labiau imta domėtis inercinio plazmos sulaikymo sistemomis, kuriose turėtų sproginėti mikroskopinės deuterio ir tričio mišinio dulkelės (lašeliai). Pirminiam dulkelių suspaudimui iš principo galima panaudoti šviesą (lazerius), elektronų ir jonų pluoštelius. Deja, „inercinio termobrandžio", kaip ir magnetinių spąstų, galimybėms tyrinėti apskritai reikalingi labai dideli įrenginiai. Taigi valdomos termobranduolinės sintezės tyrimai aštuntajame dešimtmetyje, dar labiau nei anksčiau, pasidarė ne vien fizikos, bet ir technikos problema, dargi industrinio masto. Tačiau fizika tebėra lyderė, nes tobulinami įvairūs plazmos sulaikymo principai ir metodai.

2. Superlaidumas aukštoje temperatūroje

Ši problema, bent kaip dabar ji suprantama, atsirado 1964 metais. Tikslas aiškus — sukurti, rasti tokių superlaidininkų ar kažkokių nevienalyčių superlaidžių „sistemų", kurios liktų superlaidžios bent jau skysto azoto temperatūroje 77,4 K (—196 °C). Mat skystas azotas gaunamas palyginti lengvai, todėl „azoto temperatūros" visai priimtinos technikai [6]. Nors superlaidumo teorijos laimėjimai milžiniški, ji dar neįstengia numatyti, kokioje temperatūroje pereis į superlaidumo būseną daugiau ar mažiau sudėtingi junginiai arba „sumuštiniai" iš dielektriko—metalo—dielektriko. Todėl ir rekomendacijos, kaip ieškoti aukštatemperatūrių superlaidininkų, gali būti tik kokybinio pobūdžio, nelabai konkrečios. Daugiau ar mažiau (kiek būtent — sunku pasakyti) pasinaudojus tomis rekomendacijomis, buvo susintetinta gana daug kvazivienmačių ir sluoksniuotų (kvazidvimačių) junginių, rasta nemažai naujų superlaidininkų. Kol kas aukščiausią kritinę temperatūrą — maždaug 23,2 K — turi, kaip buvo nustatyta 1973 m., niobio ir germanio junginys Nb_3Ge. Tačiau verta paminėti ir kitus įdomius re-

zultatus, kurie buvo gauti ieškant naujų superlaidininkų. Štai nustatyta, kad polimerinis sieros nitridas, kuriame, aišku, nėra metalų atomų, yra metališkas laidininkas (ir superlaidininkas 0,3 K temperatūroje). 1980 m. buvo atrastas organinio ditetrametiltetraselenfulvaleno — heksafluorfosfato kristalo superlaidumas, tiesa, atsirandantis tik 1 K temperatūroje ir tik veikiant kelių kilobarų slėgiui. Ir vis dėlto tai, atrodo, bus nauja metalų ir superlaidininkų klasė; be to, yra pagrindo tikėtis, kad kai kurių organinių junginių krizinės temperatūros bus gana aukštos. Verta paminėti ir bandymus, iš kurių buvo padaryta išvada, jog siera, tam tikru būdu apdirbta slėgimu, pasidaro superlaidi (26—31 K temperatūroje) esant dideliam slėgiui.

Ar gali kokia nors superlaidi medžiaga būti pusiausviri (gal būt, metastabili) 300 K, arba kaip dažnai sakoma, kambario temperatūroje? Teorija to neneigia. Betgi aišku: kad medžiaga būtų superlaidi bent jau azoto temperatūroje, reikia įvykdyti kai kuriuos labai griežtus reikalavimus. Todėl sėkmės niekas negarantuoja. Žinoma, reikia mėginti, ieškoti, tikrinti, ar nėra superlaidžios, vis naujas medžiagas, „sumuštinius" ir t. t.

Galbūt čia jau esama laimėjimų. 1978 m. paskelbta pranešimų, kad Maskvos universitete atskleistas superdiamagnetizmo reiškinys tam tikru būdu paruoštame vario chloride ($CuCl$), veikiamame kelių kilobarų slėgio, be to, šis reiškinys stebėtas net 150—200 K temperatūroje. Apie panašius stebėjimus pranešė amerikiečių fizikų grupė. Priminsime, kad silpnas magnetinis laukas neįsiskverbia į idealaus superlaidininko tūrį — tai vadinamasis Meisnerio efektas. Vadinasi, superlaidininkai magnetiniame lauke elgiasi kaip superdiamagnetikai. Tačiau atvirkštinis teiginys gal ir nėra teisingas — nežinia, ar superdiamagnetikas būtinai yra ir superlaidininkas, t. y. nesudaro varžos elektros srovei.

Ar stebėtasis efektas tikrai yra naujas, ar tai — tik kažkokia eksperimento klaida arba tikro superdiamagnetizmo imitacija, deja, dar nėra visiškai aišku. Jeigu tikrai atskleistas $CuCl$ superdiamagnetizmas, tai jo priežastis galėtų būti aukštatemperatūrio superlaidumo fazė (iš principo ji gali susidaryti pereinant į superlaidumo būseną kai kuriems puslaidininkiams arba pusmetaliams). Kita galima priežastis — susidarę „sumuštiniai" iš Cu ir $CuCl$ arba atsiradęs tikras paviršinis superlaidumas.

Ar galima tikėtis rasti dar nežinomo tipo medžiagų, kurios būtų superdiamagnetikai, bet skirtingi nuo įprastinių superlaidininkų? Tai dar nepakankamai išaiškinta netgi teoriškai, jau nekalbant apie eksperimentus. Kaip teisingai buvo pastebėta literatūroje, sunkumai, su kuriais susiduriama, mėginant išaiškinti $CuCl$ elgseną, nėra kažkokie išimtiniai. Tokių keblumų būta, pavyz-

džiui, ir su kai kuriomis puslaidininkinėmis medžiagomis, kurių savybės sunkiai kontroliuojamos. Čia gali turėti įtakos ir priemaišos, ir įvairūs kristalo gardelės defektai arba liktiniai įtempimai. Taigi, gali būti, tikrai atskleistas būtent CuCl aukštatemperatūris superlaidumas. Tuo labiau, kad 1980 m. stiprus diamagnetinis efektas skysto azoto temperatūroje buvo pastebėtas taip pat CdS kristaluose, apdirbtuose „grūdinimo slėgiu" metodu (sudaromas 40 Kbar slėgis ir paskui „numušamas" 10^6 bar/s greičiu). Be abejo, pastarieji rezultatai paskatino daugiau susidomėti ir vario chlorido savybėmis, ir apskritai kol kas paslaptingu aukštatemperatūrio superdiamagnetizmo mechanizmu.

Aukštatemperatūrių superlaidininkų „paieškoms" visai nereikia gigantiškų įrenginių, kaip valdomos termobranduolinės sintezės tyrimams. Todėl sėkmė gali ateiti ir nedidelėje laboratorijoje, padarydama staigmeną kitiems fizikams. Dar daugiau, gal toks sėkmės švystelėjimas ir buvo CuCl bei CdS tyrimų rezultatai? Jei iš tiesų taip ir yra, tai galime sakyti, kad perspektyvos gauti ir ištirti aukštatemperatūrius puslaidininkus — kuo puikiausios.

3. Naujos medžiagos (metalinio vandenilio ir kai kurių kitų medžiagų gavimo problema)

Paprastai manoma, kad kurti naujas medžiagas — medžiagotyrininkų arba chemikų darbas. Tačiau kas kita tokios medžiagos, kaip metalinis vandenilis. Jį gauti, be abejo, jau fizikų uždavinys, ir dar nežinia, kaip išsprendžiamas.

Vandenilio metališkoji fazė, be abejo, egzistuoja, kai slėgis didesnis kaip 2 Mbar. Galbūt metalinis vandenilis — superlaidininkas, dargi aukštatemperatūris: jo krizinė temperatūra veikiausiai būtų 100—200 K. Literatūroje jau buvo pranešimų, esą gautas metalinis vandenilis, bet apskritai ši problema paini. Fizikai nėra tvirtai įsitikinę, kad metalinė vandenilio fazė tikrai buvo stebėta, o svarbiausia, jos savybės (tarp jų ir superlaidumas) dar visai nežinomos. Sunkiausia — sudaryti reikalingą 2—3 Mbar slėgį. Toks slėgis lengvai pasiekiamas smūginėmis bangomis, bet šitaip suspaudžiama medžiaga įkaista, jau nekalbant apie tai, kaip sunku išmatuoti per labai trumpą laiką kai kuriuos parametrus. Labai mažuose tūriuose reikiamą slėgį būtų galima sudaryti ir paprastais presais, bet nėra tam tinkamų medžiagų — netgi deimantas nuo tokio slėgio pradeda „tekėti". Matyt, čia reikia kažkokio visai naujo sprendimo. Kad ir kaip sektųsi, iki bus gautas metalinio vandenilio „gabaliukas" turbūt praeis dar nemažai laiko.

Kitas egzotiškos medžiagos pavyzdys, minėtas [1] straipsnyje,— tai anomalus (supertankus, arba polimerinis) vanduo, apie kurio

egzistavimą tada buvo plačiai diskutuojama [7]. Aš rašiau, kad šis dalykas dar nėra aiškus, nors mažai vilties, kad grynas polimerinis (supertankus) vanduo egzistuotų. Praslinko palyginti nedaug laiko, ir kalbos apie anomalųjį vandenį nutilo: paaiškėjo, kad tyrinėtasis skystis buvo tik paprastas vanduo su tam tikromis priemaišomis.

Visa ši „atradimo" ir „praradimo" istorija mums primena, kaip svarbu visapusiškai patikrinti eksperimentais duomenis, kai iš jų daromos svarios išvados. Tokių darbų autoriai turi teisę juos skelbti, nes rizikuoja daugiausia. Be to — tai dar svarbiau — paskelbtus rezultatus greičiau gali patikrinti kitos laboratorijos. Todėl nereikia griežtai smerkti (kaip kartais daroma) autorių, paskelbusių klaidingus rezultatus, žinoma, jeigu jie nuoširdžiai suklydo ir bandymai buvo deramo lygio. Bet ko jau tikrai niekas neturi teisės reikalauti — tai „atradimų" pripažinimo, kol jie nepatvirtinami keliose vietose. Autoriai turi teisę „protingai" suklysti, bet visi kiti turi ne mažesnę teisę suabejoti.

4. Metalinis eksitoninis skystis puslaidininkiuose

Pirmiausia vertėtų šį tą priminti: jeigu puslaidininkyje yra elektronų ir „skylių" (judrių krūvininkų, pernešančių teigiamą krūvį), tai pakankamai žemoje temperatūroje jie gali susijungti į eksitonus — sistemas, panašias į vandenilio atomą. Jeigu pastarųjų koncentracija pakankamai didelė, tai, kaip numato teorija, jie turi elgtis puslaidininkyje tarsi skystis. Be to, tankioji sanglauda eksitonų sistemoje pasiekiama, esant palyginti nedidelei elektronų ir skylių koncentracijai (o, pavyzdžiui, tankioji atomų sanglauda metaliniame vandenilyje susidaro tik milžiniškame slėgyje). Taip yra todėl, kad eksitonų matmenys daug didesni už atomų matmenis. Taigi čia, be kitko, galima imituoti superaukšto slėgio sritis ir tyrinėti „sunkiai prieinamus" procesus. O svarbiausia — dabar, kaip niekada anksčiau, puslaidininkių fundamentalių tyrimų rezultatai gali būti įdomiai pritaikyti praktikoje.

Eksitoninio skysčio problema, išskirta [1] straipsnyje kaip viena svarbiausių puslaidininkių fizikos problemų, dabar iš esmės išspręsta — gautas ir neblogai ištirtas metalinis eksitoninis skystis, iš kurio kietame puslaidininkyje susidaro tikrų tikriausi judrūs lašai. Tiesa, padaryta anaiptol dar ne viskas, — o jau kyla naujų esminių klausimų, bet taip būna beveik visada. Ir vis tik šiandien vargu ar derėtų išskirti metalinio eksitoninio skysčio problemą kaip vienintelę iš visos puslaidininkių fizikos ir bemaž visos kietojo kūno fizikos. Tuo labiau, kad per paskutinįjį dešimtmetį išryškėjo kiti labai įdomūs šios srities klausimai. Plačiai tiriami, pa-

vyzdžiui, metalų faziniai virsmai dielektrikais, netvarkieji puslaidininkiai, vadinamieji sukininiai stiklai ir kvantiniai kristalai, taip pat sluoksniniai ir siūliniai junginiai (medžiagos).

5. Antrosios rūšies faziniai virsmai (kriziniai reiškiniai), jų pavyzdžiai

Nuo mokyklos suolo „fazinio virsmo" sąvoką mes siejame su vandens (skysčio) virsmu ledu (kietuoju kūnu) arba garais (dujomis). Vėliau galbūt dar sužinosime apie kitokius atomų ar molekulių sistemos būsenos staigius pokyčius (daugiausia jie minimi, kalbant apie metalus, lydinius, dujų mišinius, kristalines struktūras). Gal dar žinome ir apie vadinamuosius antrosios rūšies fazinius virsmus, per kuriuos medžiagos vidinė energija ir tankis nepakinta, o staiga pakinta, pavyzdžiui, šiluminė talpa, spūdumas, magnetinės savybės, pereinama į superlaidumo būseną ir kt.

Faziniai virsmai — tai, tiesą sakant, daugiau negu viena problema. Tačiau visi faziniai virsmai turi bendrų bruožų, todėl galima išskirti ir bendrą fazinių virsmų teoriją.

Sukurti antrosios rūšies fazinių virsmų ir krizinių reiškinių teoriją, kuri aprašytų, bent iš principo, visus realius virsmus,— šiandien viena pagrindinių *kondensuotųjų aplinkų* fizikos problemų. Tai labai sunkus uždavinys. Tačiau dar septintame dešimtmetyje fizikai pasiekė svarių laimėjimų, kurie per pastarąjį dešimtmetį buvo įtvirtinti. Buvo įvesti vadinamieji kriziniai indeksai (jie apibūdina medžiagos savybes artėjant prie fazinio virsmo temperatūros), sukurti gana tobuli jų apytikslio skaičiavimo metodai, kartu tiksliau išmatuoti įvairūs dydžiai arti virsmo taško. Visa tai gerokai pastūmėjo į priekį fazinių virsmų teoriją. Tačiau ar galime sakyti, kad toji teorija iš esmės užbaigta? Be abejo, iš teorijos galima reikalauti, kad ji būtų pagrindas vieningai nagrinėti visus termodinaminius bei *kinetinius procesus* ir reiškinius, vykstančius arti virsmo taško,— užtektų tik parinkti koeficientus lygtyse, aprašančiose procesus, remiantis eksperimentų duomenimis. Jeigu fazinių virsmų teorijai ir kelsime šitokius šiek tiek ribotus reikalavimus, tai vis tiek turėsime pripažinti, kad ji anaiptol dar nėra baigta. Nekalbant jau apie tai, kad ji kol kas nagrinėja tik vienalytes aplinkas, nors daug kuo įdomios ir aplinkos su granulėmis bei defektais, nevienalyčių išorinių laukų įtaka ir kt. Pagaliau, daugelį reiškinių (tekėjimą skystuosiuose kristaluose ir skystame helyje, garso sklidimą, kai kurių dydžių *relaksaciją* ir kt.) būtina tyrinėti sąlygomis, visai artimomis fazinio virsmo taškui. Dar daugiau — būtent tomis sąlygomis jie itin įdomūs,— o čia, aiškiai matyti, teorija dar neužbaigta.

Tačiau, tiriant konkrečius fazinius virsmus ar netgi virsmus ištisose medžiagų klasėse, per paskutinį dešimtmetį sužinota daug naujo. Galima prisiminti fazinius virsmus *skystuosiuose kristaluose, kvantiniuose kristaluose*, kvazivienmatėse ir kvazidvimatėse medžiagose, fazinius virsmus paviršiuje, skystame ^{3}He (lengvajame helio izotope) ir atominiame vandenilyje. Vertėtų apie kiekvieną šių virsmų papasakoti atskirai, bet čia jų neįmanoma aprėpti. Todėl pasitenkinsime keliomis pastabomis apie skystą ^{3}He.

Jau gana seniai buvo svarstoma, ar skystame ^{3}He gali susidaryti (panašiai kaip superlaidininkuose) dviejų atomų „poros", kurių *sukinys* būtų lygus 0 arba 1 (vieno ^{3}He atomo sukinys lygus 1/2). Susidarius poroms, kurių sukinys — sveikasis skaičius, ir joms susikondensavus, skystis turėtų būti supertakus (reiškinys, analogiškas superlaidumui, nes, kaip žinome, superlaidumą galime laikyti elektroninio skysčio supertakumu metaluose arba protoninio skysčio — neutroninėse žvaigždėse). Tačiau anksčiau nepavykdavo teoriškai patikimai įvertinti temperatūrą, kurioje skystis tampa supertakus, ir eksperimentuojant buvo gauti gana nelaukti rezultatai. Štai 1972 ir 1973 m. paaiškėjo, kad skystame ^{3}He (tiesa, veikiamame iki 34 atm slėgio) įvyksta netgi ne vienas, o du faziniai virsmai — 0,002 K ir 0,0026 K temperatūroje. Vėliau buvo nustatyta, kad tai yra perėjimai į supertakumo būsenas, kurios skiriasi bendru poros judėjimo kiekio momentu. Trauka, dėl kurios susidaro poros, yra, atrodo, pamaininio pobūdžio (tokio pat pobūdžio jėgos lemia *feromagnetizmą*). Paskutiniaisiais metais atlikti supertakumo ir kitų efektų skystame ^{3}He tyrimai, stebinantys subtilumu ir mastais (beje, izotopo ^{3}He gamtoje yra labai mažai — šimtus kartų mažiau negu izotopo ^{4}He). Tie tyrimai juk atliekami temperatūrose, vos tūkstantosiomis laipsnio dalimis besiskiriančiose nuo absoliutinio nulio, ir su nepaprastai sudėtingu fizikiniu objektu — supertakiuoju ^{3}He.

6. Paviršiaus fizika

Paviršius ir įvairūs jame vykstantys procesai bei reiškiniai domina fizikus ne vieną dešimtmetį. Lengva suprasti, kad paviršiuje ir prie jo atomai ir elektronai yra kitokiose sąlygose negu tūryje, todėl čia pagrįstai galima tikėtis naujų fazių, įvairių fazinių virsmų, naujų tipų sužadinimo ir pan. [3]. Pavyzdžiui, paviršiuje (jam priskirsime ir ploną gretimą sluoksnį) kristalinė gardelė bus kitokios struktūros arba parametrų, paviršiniame sluoksnyje gali būti magnetinių jėgų palaikoma tvarka, kurios tūryje toje pačioje temperatūroje nebūna, ir kt. Žinoma, kad paviršiumi sklinda įvairios paviršinės bangos — akustinės, *poliaritonų, magnonų*. Su paviršiaus ypatumais glaudžiai siejasi plonų plėvelių ir sluoksnių (tarp

jų ir monomolekulinių) savybės, taip pat atskirų atomų, molekulių defektų elgsena paviršiuje.

Ir vis dėl to prieš dešimtmetį rašytame straipsnyje [1] nebuvo skirsnio „Paviršiaus fizika". O dabar tiesiog būtina išskirti šį mokslą ir pabrėžti jo svarbą: tai, kas anksčiau atrodė tik galima, dabar, ištobulėjus eksperimentų technikai, darosi realu. Jau gauta labai daug rezultatų. Ypač verti dėmesio tyrimai inversinių sluoksnių Si ir SiO_2 sandūroje, elektronų savybių skysto helio paviršiuje, paviršinių poliaritonų tyrimai ir kai kurių kristalų paviršių „rekonstrukcija", pakitus gardelės parametrui. Pavyzdžiui, silicio paviršiuje gardelės parametras gaunamas 7 kartus didesnis negu tūryje.

Įspūdingi tiek savo mastais, tiek ir svarba fazinių virsmų dvimatėse ir kvazidvimatėse sistemose tyrimai (tiriamos plonos plėvelės paviršiuose ir silpnai surištos plėvelės). Čia atsiskleidžia savita fizika.

7. Medžiagos savybės superstipriuose magnetiniuose laukuose. Labai didelių molekulių tyrimai. Skystieji kristalai

Šios problemos menkai tarp savęs susijusios, jų nerasite [1] straipsnyje. Čia jas sujungiau į vieną skirsnį tik todėl, kad negaliu plačiau gvildenti kiekvieną atskirai, o visiškai jų neliesti nenorėčiau.

Superstipriais laikomi tokie magnetiniai laukai, kuriuose atomų, molekulių arba iš jų sudarytų kondensuotų aplinkų sandarą lemia jau ne elektrinio, o magnetinio lauko jėgos. Iki atrandant pulsarus (1967 m.) kalbos apie medžiagų savybes superstipriuose magnetiniuose laukuose buvo daugmaž abstrakčios. Tačiau dabar mes žinome, kad magnetinių neutroninių žvaigždžių — pulsarų — paviršiuje magnetinio lauko stiprumas siekia 10^{12}—10^{13} erstedų (tūkstančius milijardų kartų didesnis už Žemės lauko stiprumą). Taigi žvaigždės paviršinio sluoksnio atomuose įprastinės elektrinės jėgos kur kas menkesnės už veikiančias magnetines jėgas [8]. Labai tikėtina, kad tokiame sluoksnyje dominuoja visai mums neįprasta medžiaga — ištemptos išilgai lauko geležies molekulės Fe_2, sudarančios tam tikrą *polimerinę* struktūrą su didžiule ryšio energija. Tai labai svarbu visai pulsarų elektrodinamikai, nes apibūdina elektronų ir jonų „išplėšimo" iš jų paviršiaus sąlygas.

Tam tikromis sąlygomis magnetinis laukas gali turėti didesnės įtakos už Kulono jėgas, nors jo stiprumas — tik toks, kokį galima pasiekti Žemėje. Pavyzdžiui, vandeniliškų eksitonų, susidarančių puslaidininkyje, ryšio energija yra apie tūkstantį kartų mažesnė negu paties vandenilio atomo, todėl „eksitoninę medžiagą" ir laboratorijose galima tyrinėti stipriuose, netgi superstipriuose jos atžvilgiu laukuose.

Biologinių klausimų, kad ir kokie jie svarbūs, čia, kaip ir [1] straipsnyje, visai neliesime. Pasiteisinimui, jeigu jo reikia, galiu priminti protingą patarimą: nesistenkime aprėpti neaprėpiamo. Jei vis dėlto čia užsiminėme apie reikšmingiausias biologijai milžines molekules (baltymų, nukleino rūgščių), tai dėl dviejų aplinkybių: Pirma, jos užima tam tikrą tarpinę padėtį tarp „paprastų" molekulių ir kondensuotųjų aplinkų arba kondensuotos medžiagos lašelių bei siūlų. Tam tikra prasme čia taip pat galima kalbėti apie fazinius virsmus, dalelių tvarką, laidumo zonas ir kt. Antra, atrodo, ši fizikos sritis gerokai atsilieka nuo kitų sričių: nėra sukurta efektyvių metodų milžinių molekulių sandarai tirti, kad ir tais atvejais, kai jų labai mažai, jos yra tirpale arba sumišusios su kitomis molekulėmis. Šie tyrimai yra potencialiai tokie svarbūs, kad fizikai privalo jų neišleisti iš akiračio.

Skystieji kristalai seniai žinomi. Tačiau dar mename tą laiką, kai fizikai į juos žiūrėjo bemaž kaip į kuriozą: mat kaip būna — kartu ir kristalas, ir skystis! Laukė daugybė paprastesnių tyrimo objektų, skystieji kristalai nebuvo taikomi technikoje — ir iš dalies todėl jų tyrimai liko šešėlyje. Dabar visai kas kita: skystieji kristalai plačiai naudojami technikoje, jie labai svarbūs biologijoje. Ir, pagaliau, įvairių tipų skystieji kristalai, jų faziniai virsmai sudomino fizikus, įvairiais aspektais tyrinėjančius kondensuotąsias aplinkas. Susidomėjimas jais neblėsta [9].

8. Razeriai, grazeriai ir naujų tipų lazeriai

Lazerių technikos raida ir jų taikymai (turime omenyje ir netiesinę optiką) — tai didžiulė fizikos ir technikos problema. Bet čia norime pakalbėti tik apie tokius lazerius, kurie būtų arba iš principo naujų tipų, turėtų keliomis eilėmis didesnę galią, negu dabar pasiekta (galbūt tokiai galiai gauti prireiks naujų metodų arba principų). Beje, iš šios „atrankos" matome, koks sąlygiškas kiekvienas „itin svarbių ir įdomių" problemų sąrašas. Praktiškai kiekvienoje fizikos ir astrofizikos srityje šoktelėti per kelias dydžio eiles, kartais ir vieną eilę,— tai jau „itin svarbi" problema, anaiptol ne visada ir reali. Vieną iš daugybės tokių pavyzdžių pateikia aukštų slėgių fizika. Slėgiai maždaug iki 1 Mbar apskritai jau yra „įsisavinti", bet, kaip jau esame minėję, pastebimai žengtelėti dar aukščiau, didinant statinį slėgį, neleidžia esminės kliūtys. Pasiekti iki 10 Mbar statinį slėgį nevisiškai mažučiuose tūriuose (ir kontroliuojamą) būtų principinis laimėjimas. Tačiau mūsų sąraše problemos nėra (bent jau aiškiai suformuluotos), nes vien pageidavimai ir kalbos — tai dar ne reali fizikos problema.

Pastaraisiais metais daug rašoma apie naujos rūšies kvantinius generatorius — laisvaelektronius lazerius. Čia plėtojama gana sena idėja generuoti elektromagnetines bangas reliatyvistinių (judančių greičiais, palyginamais su šviesos greičiu) elektronų pluošteliu, leidžiamu pro onduliatorių. Paprasčiausias onduliatorius — tai magnetų sistema. Ji sukuria išilgai pluoštelio kintamą magnetinį lauką, kuris virpina elektronus. Galima tikėtis, kad šis lazeris bus praktiškai naudingas mikroelektronikai ir optikai. O ar pavyks efektyviai pritaikyti Rentgeno spinduliams generuoti panašią sistemą su didelio tankio reliatyvistinių elektronų pluoštu,— dar visai nežinoma.

Pastebėsime, kad uždavinys sukurti labai galingus Rentgeno spindulių šaltinius apskritai jau išspręstas: pritaikomi *sinchrotronai*, kuriuose susideda daugybės paskirų elektronų nekoherentinis spinduliavimas. Panašų į lazerį koherentinių Rentgeno spindulių šaltinį galime vadinti „razeriu", o koherentinių gama spindulių šaltinį — „grazeriu" [10]. (Priminsime, kad žodis „lazeris" sudarytas iš pirmųjų raidžių angliškos frazės „light amplification by stimulated emission of radiation", kuri reiškia: „šviesos stiprinimas priverstiniu spinduliavimu"). Todėl kalbėti apie „Rentgeno lazerį" ir „gama lazerį", žinoma, nenuoseklu. „Razerio" ir „grazerio" pavadinimai sudaryti žodyje „lazeris" raidę „l" pakeitus raide „r" (Rentgeno) ir „gr" (gama ray).

Sistemose su elektronų pluošteliu koherentiškumas „nesutrinka" tik esant pakankamam pluoštelio tankiui ir kitoms sąlygoms, kurias sunku išpildyti Rentgeno diapazone. Buvo siūloma kurti razerius, pagrįstus atomų būsenos kitimais, o grazerius — branduolio būsenos kitimais, bet čia, atrodo, nieko esmingo nepasiekta. Kiti keliai, jau anksčiau nušviesti spaudoje, yra, švelniai sakant, labai sudėtingi (pavyzdžiui, siūloma panaudoti branduolinį sprogimą).

Tačiau ne visos svajonės virsta realybe, o juo labiau — sudomina praktikus. Todėl gali atsitikti ir taip, kad razeriai ir grazeriai niekada nebus sukurti ar bent jau plačiai pritaikyti. Bet kas žino. . . Kokia nors netikėta idėja gali, kaip jau ne kartą atsitiko fizikos istorijoje, iš principo, radikaliai pakeisti padėtį.

9. Supersunkieji elementai (tolimieji transuranai). „Egzotiškieji" branduoliai

[1] straipsnyje branduolio fizika ne tik buvo priskirta „makrofizikai" — iš jos tebuvo paminėta vienintelė (supersunkiųjų elementų) problema. Ir viena, ir kita buvo ginčytina, o dabar jau aiš-

kiai matyti, kad „ypatingos svarbos" problemų branduolio fizikoje tikrai daugiau...

Supersunkiųjų elementų paieškose ryškių pokyčių neįvyko, nelengva ir nesparti laboratorinė transuranų sintezė jau prisikasė iki 107-ojo elemento [11]. Tiesa, 1976 m. viename iš autoritetingiausių fizikos žurnalų „Physical Review Letters" buvo paskelbta, kad aptikti gana stabilūs elementai, kurių eilės numeriai Mendelejevo lentelėje (tai yra branduolių krūviai, jų protonų skaičiai) — 116, 126 ir kitokie. Tačiau šis darbas, kaip paaiškėjo, buvo klaidingas. Neklysta tik tas, kas nedirba, ir tokių klaidų, kaip jau kalbėjome, nereikia dramatizuoti. 1980 m. atspausdintas pranešimas, kad galbūt rastas pėdsakas branduolio, kurio krūvis (protonų skaičius) didesnis nei 110; pėdsakas aptiktas meteoritinės kilmės olivino kristale, pirminis supersunkiosios dalelės šaltinis — kosminiai spinduliai. Šį rezultatą, be abejo, dar reikia patvirtinti — rasti naujų pėdsakų ir papildomai įrodyti, kad pėdsaką paliko būtent toks sunkus branduolys. O įvairūs kiti branduolio fizikos klausimai? Verta atkreipti dėmesį, kad neretai, tyrinėjant branduolį, gaunama žinių apie nukleonų sąveiką su nukleonais ir leptonais.

Daug dėmesio skiriama branduolinei medžiagai, egzistuojančiai pirmiausia neutroninėse žvaigždėse. Labai įdomios spaudoje vykusios diskusijos, ar gali egzistuoti branduolinė medžiaga ir atomų branduoliai, kurių tankis didesnis už įprastinį du ir daugiau kartų. Žinomuose branduoliuose tokia tanki fazė, regis, nesusidaro, bet svarstomos perspektyvos pastebėti jos apraiškas kai kuriuose branduoliuose. Daug dėmesio pastaraisiais metais skiriama ir sunkiųjų branduolių, judančių artimais šviesai greičiais, susidūrimams. Apskritai atomo branduolio tyrimai, be abejo, siejasi, kaip ir anksčiau, su daugeliu principinių makrofizikos, taip pat ir mikrofizikos problemų.

MIKROFIZIKA

Mikrofizikai čia priskiriama (apskritai kaip ir visur priimta) „elementariųjų dalelių" fizika — protonų, neutronų ir kitų; *barionų, fotonų, mezonų, leptonų* sandaros, savybių, sąveikos tyrinėjimai. Dažnai ši sritis vadinama didelių energijų fizika — beje, vienpusiškai, nes anaiptol ne visi dalelių tyrimai tiesiogiai susiję su didelėmis energijomis.

[1] straipsnis buvo parašytas tada, kai mikrofizika patyrė lyg ir pakrikimo, svyravimų metą, nors jau mezgėsi ir brendo idėjos, davusios puikių rezultatų ir atvėrusios kvapą gniaužiančias perspektyvas. Ano meto atmosferą galima apibūdinti, Einšteino žodžiais, kaip „ilgus ieškojimų patamsyje metus, su nuojautomis, įtemptu laukimu, kai kaitaliojasi tai viltis, tai bejėgiškumas".

Straipsnyje buvo pabrėžta, kad mikrofizikos problemos — tai fundamentaliosios, principinės problemos, todėl daugeliui jos patraukliausios; tai — priešakinės linijos skverbiantis į medžiagos sandaros paslaptis. Ši mintis buvo teisinga vakar, ji, be abejo, teisinga šiandien ir bus teisinga rytoj, nors tyrinėjimų objektai keisis. Kai mikrofizikos dėmesio centre buvo atomai ir atomų branduoliai, ji dominavo visame gamtos pažinime, lėmė žmonijos raidos kelius. Kvarkai ir *gliuonai* — naujų tipų ir rūšių dalelės, jų tyrinėjimai kerinčiai įdomūs ir svarbūs fizikai, bet jie vaidina jau ne tokį (kaip atomai ir branduoliai) vaidmenį visame moksle ir žmonių visuomenės gyvenime. Šiandien mikrofizika užima tarp mokslų panašią padėtį kaip ir astrofizika (įskaitant kosmologiją), pirmiausia — savo patrauklumu tiesiog žmogiškąja prasme. Juk būna, kad skaitydamas apie kvarkus ir protono nestabilumą, apie neutronines žvaigždes ir juodąsias skyles, žmogus pamiršta net duoną kasdieninę, sotinasi mokslo įdomybėmis.

Ar neišryškės ateityje nauja ypatingai svarbi mikrofizikos praktinio pritaikymo sritis, panaši kaip, sakykime, atominės energijos pritaikymas? Suprantama, daugmaž tvirtai paneigti tokią perspektyvą negalima. O gali būti ir priešingai, bet tai vis tiek netemdo mikrofizikos jokiu šešėliu.

10. Kvarkai ir gliuonai. Kvantinė chromodinamika

Iš kokių paprasčiausių „elementų" susideda medžiaga? Šis klausimas domino visais laikais. Palyginti neseniai molekules ir atomus „elementų" vaidmenyje pakeitė nukleonai, elektronai, neutrinai. Tokių dalelių, dažnai vadintų elementariosiomis (dabar šis terminas vartojamas vis rečiau), radosi vis daugiau ir daugiau. Natūralu, kad kilo (tiksliau sakant, sustiprėjo) noras kažkaip jas unifikuoti ir rasti „pačias paprasčiausias" iš elementariųjų dalelių. Buvo siūloma įvairių kelių, ir vienas jų buvo kvarkų hipotezė, gimusi 1963/64 m.

Vos ją paskelbus, hipotezė buvo sutikta prieštaringiausiomis nuomonėmis. Tą pirmiausia galima paaiškinti tam tikrais bendrais samprotavimais, verčiančiais suabejoti, ar prasmingas šitoks klausimas: „Iš ko susideda protonas?" Antra, kvarkai „apdovanojami" trupmeniniais elektros krūviais, lygiais 2/3 ir — 1/3 (krūvio vienetu laikomas pozitrono arba protono krūvis). O juk trupmeninių krūvių niekada nebuvo pastebėta, jie buvo neįprasti. Dar daugiau, visos laisvų, izoliuotų kvarkų paieškos, energingai tęsiamos nuo pat 1964 m., liko bevaisės. Žinoma, kategoriškai teigti, kad to ar to nėra (neegzistuoja),— labai sunku. Tačiau peršasi išvada (šiandien ji ir laikoma labiausiai tikėtina), jog kvarkai negali būti laisvi,

t. y. egzistuoti kaip individualios dalelės, panašios į barionus, mezonus, leptonus. Atrodytų, tai jau pakankamas pagrindas suabejoti pačiu kvarkų, kaip tam tikros fizikinės realijos, egzistavimu. O vis tik kvarkų modelis ne tik nebuvo atmestas, bet dargi sutvirtino savo pozicijas ir švenčia pergalę po pergalės [3, 12, 13, 14].

Dabar laikoma, kad jau patikimai įrodyta, jog egzistuoja keturių tipų, arba, kaip dažnai sakoma, ketveriopo aromato kvarkai; jie žymimi raidėmis *u, d, s, c.* Kiekvienam kvarkui egzistuoja antikvarkas, be to, visi jie gali būti trijų atmainų — gali įgyti tris vertęs tam tikras jų kvantinis skaičius, pavadintas, visiškai „kaip šovė į galvą" — spalva (pavyzdžiui, raudona, geltona ir mėlyna). Trys kvarkai, sudarantys barioną, privalo būti trijų skirtingų spalvų, dėl to barionas yra „bespalvis". Mezonai, susidedantys iš kvarko ir antikvarko, taip pat bespalviai, nes antikvarko „antispalva" neutralizuoja kvarko spalvą.

Taigi iš viso minėtųjų kvarkų ir antikvarkų, atsižvelgę į spalvą, jau priskaičiuosime 24. Beje, tai dar ne viskas. Dabar, remiantis ir teoriniais, ir eksperimentiniais duomenimis, „apsireiškė" ir penktojo bei šeštojo aromato kvarkai.

Pripažinus šešeriopą aromatą ir tris spalvas, bendras kvarkų ir antikvarkų skaičius jau bus, aišku, 36. Literatūroje paskelbta hipotezių, kad aromatų ir spalvų gali dar padaugėti. Šiaip ar taip, teigti, kad kvarkinis modelis apsiribos 24 ar bent 36 kvarkais, dar šiukštu negalime. Užtenka pasakyti, kad kvarkai tarp savęs sąveikauja, ir toji sąveika susijusi su pasikeitimu tam tikrais laukų kvantais (panašiai kaip elektromagnetinė sąveika susijusi su pasikeitimu fotonais). Kvarkus „suklijuojančių" laukų, vadinamų gliuoniniais (iš angliško žodžio „glue" — „klijai") tenka įvesti vėlgi keletą, paprastai 8. Kiekvieną tokį lauką atitinka savi kvantai — dalelės (gliuonai). Neseniai gauta daugmaž tikrų eksperimentinių nuorodų, jog gliuonai egzistuoja.

Vadinasi, bendras dalelių skaičius kvarkiniame modelyje siekia kelias dešimtis. Ar ne per daug? Toks, tegu ir retorinis, klausimas nejučiomis ateina į galvą, ėmus kalbėti apie kvarkinio modelio pranašumus. Žinoma, tokios abejonės vargu ar vertos dėmesio; kad ir nemažai priskaičiuojama kvarkų ir gliuonų, bet išreiškus jų kombinacijomis šimtus hadronų, atsiskleidžia tam tikra tvarka.

Kur kas gilesnis ir svarbesnis kitas klausimas: ar prasminga kalbėti apie daleles (kvarkus), kurių neaptinkama laisvų, ir ką gi reiškia teiginys, jog barionas „susideda" iš trijų kvarkų? Į šį klausimą, tiesa, galima atsakyti visai apibrėžtai: pavyzdžiui, protonas sklaido elektronus taip, tarsi jis būtų sudarytas iš trijų taškinių dalelių. Pastarosios buvo pavadintos partonais (nepainiokime su protonais!), o tų partonų vaidmeniui visai tinka kvarkai.

Vis dėlto tai dar neįrodo kvarkų buvimo. Pavyzdžiui, magnetinė rodyklė (kaip ir bet kuris magnetas) elgiasi taip, tarsi jos galuose būtų magnetiniai poliai. O iš tiesų jokių magnetinių polių nėra (bent jau įprastinėmis sąlygomis), viskas paaiškinama elektros srovėmis (elektronų judėjimu) ir įvairių medžiagos dalelių (elektronų, protonų ir kt.) dipoliniais (sukinio) magnetiniais momentais. Šis magnetinių polių ir kvarkų sugretinimas, regis, gana prasmingas: kad ir kaip smulkintume magnetą, poliai vis tiek liks „suporuoti" — bet koks magnetėlis turės šiaurės ir pietų polių; panašiai ir per bet kurį žinomą hadrono virsmą neatsiranda izoliuotų kvarkų — pastarieji gimsta tik kaip barionai ir mezonai, tai yra trejetais ir dvejetais. Dar reikia pasakyti, kad ir pats kvarkinis modelis pateikiamas ne vieninteliu variantu. Dar neseniai buvo siūlomos ir tokios schemos, kuriose kvarkų krūviai laikyti sveikaisiais skaičiais. Bet dabar jau gauta, atrodo, visai patikimų eksperimentinių duomenų, bylojančių apie trupmeninius kvarkų krūvius.

Galima sakyti, kad kvarkų egzistavimo problema — tai dalis bendresnės problemos: ar galima atskirti paprastąsias (elementariąsias) ir sudėtines (sudėtingas) daleles. Pavyzdžiui, galima tvirtinti, jog vandenilio atomas susideda iš protono ir elektrono, nes šį atomą lengva „suskaldyti" (jonizuoti), išeikvojant tik šiek tiek daugiau kaip 13,6 eV energijos — visiškai mažai, palyginus su 1 MeV energija, būtina elektrono ir pozitrono porai sukurti. O ar neutronas susideda iš protono ir elektrono, kaip kad buvo spėjama dar senokai iki jį atrandant, kai apie jį buvo kalbama kaip apie hipotetinį vandenilio „mikroatomą"? Kaip žinoma, į šį klausimą atsakoma neigiamai ir neutrono skilimas interpretuojamas kaip elektrono ir antineutrino gimimas, neutronui virstant protonu ($n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu} + 0{,}8$ MeV). Sakyti, kad neutronas susideda iš protono, elektrono ir antineutrino, negalima kad ir todėl, jog pats protonas gali virsti į neutroną, pozitroną ir neutriną (energija tuomet absorbuojama: toks virsmas vyksta aktyviuose pozitronus išspinduliuojančiuose branduoliuose). Štai tokie pavyzdžiai ir byloja, jog sąvoka „susideda iš" yra ribota, kai ją taikome dalelėms, kurioms būdinga didelė ryšio energija arba skilimo produktų energija. O būtent tą galime apskritai pasakyti apie hadronų kvarkinius modelius.

Vadinasi, palyginti didelės ryšio energijos ir ypač tai, kad nėra laisvų kvarkų (šį faktą priimta vadinti kvarkų „įkalinimu"), be abejo, teikia pagrindo įtarti, jog kvarkai tėra pagalbiniai vaizdiniai (kaip kad magnetiniai poliai elektrodinamikoje), kad ir patogūs įvairiems reiškiniams ir hadronų savybėmis aprašyti, bet neturintys esminės prasmės. Būtent šitokį požiūrį dėstė, be kitų, ir

vienas iš kvantinės teorijos kūrėjų Heizenbergas, baigdamas penktąjį fizikai pašvęstą dešimtmetį. Atsargumo laikosi, kalbėdami apie kvarkų egzistavimą ir jų vaizdinių fundamentalumą, netgi kai kurie fizikai, aktyviai sprendžiantys šią problemą.

Abejonės moksle labai gajos. Jos, kaip ir atsargumas, žinoma, naudingos. Tačiau gyvenimas, mokslo raida eina savo keliu, nepaiso atsargumo ir abejonių. Kvarkinis modelis ir juo pagrįsta *stipriųjų sąveikų* teorija — kvantinė chromodinamika — įsitvirtino kaip labai vaisingos, euristinės teorijos. Dar daug kas gali pasikeisti, bet lyg ir neliko abejonių, jog kelio atgal jau nėra: kvarkai ir kvantinė chromodinamika — vertingas fizikos pasiekimas.

Kokios su kvarkais susijusios problemos svarstomos šiandien?

Nors kai kurie bandymai dar tęsiami, bet jau beveik neabejojama, jog kvarkai „įkalinami" hadronuose, vadinasi, nebūna laisvi. Beje, gal tam tikromis ypatingomis sąlygomis, tarkime, absorbavę itin didelę energiją, kvarkai ir galėtų „išsilaisvinti"; tada neliktų prieštaringų faktų: kvarkų tiesiog negalima išlaisvinti turimomis priemonėmis, laisvų kvarkų koncentracija gamtinėse medžiagose turbūt be galo maža. O koks yra kvarkų sulaikymo mechanizmas? Konkrečiai jis dar nežinomas, nors galbūt jį galima išaiškinti remiantis jau naudojama kvantinės chromodinamikos schema. Mat jos lygtys yra netiesinės ir apskritai labai sudėtingos (palyginus kad ir su kvantinės elektrodinamikos lygtimis). Todėl ne viskas jau išaiškinta netgi remiantis jau turima teorija.

Kvantinės chromodinamikos tolesnė raida — didžiulė ir svarbi problema. Be to, kaip jau minėjome, kad ir karščiausiai pritardami kvarkiniam modeliui, dar negalime sakyti, jog kvarkų skaičius galutinai nustatytas. Na, kol energijos nedidelės, šitai ne taip jau svarbu, nes tada daugiausia „veikia" lengvesnieji kvarkai, pirmiausia *u* ir *d*. Gilesnę prasmę turi klausimas, ar kvarkai — tai pagaliau paskutinės „plytelės", iš kurių „sumūryti" hadronai. Jau vien dėl to, kad kvarkų daug, atsirado hipotezė, jog esama dar protokvarkų, arba prekvarkų. Kad ir kaip čia būtų, vis tik kada nors skaidymas, regis, turėtų „pasibaigti". Sunku patikėti esant „begalinę matriošką": atidarei vieną lėlę, — o joje kita, ir taip be galo. Tiesą sakant, tokie faktai, kaip dalelių tarpusavio virsmai (pirmiausia — protono virsmas neutronu ir atvirkščiai), atrasti praeitame mikrofizikos raidos etape, ir kvarkų „įkalinimas", apie kurį kalbama dabar, byloja jog kiekviena nauja „matrioška" turi kokybiškai naujų bruožų. Taigi palyginimas su matrioškomis — gana sąlygiškas. Galbūt hadronų skaidymas ir baigsis kvarkais, bet jokių realių įrodymų prieš protokvarkus taip pat dar neturime. Kaip bus galvojama apie tai dar po dešimtmečio? Žinoma, niekas neišdrįs atsakyti į šį klausimą.

11. Vieningoji silpnosios ir elektromagnetinės sąveikos teorija. W bozonai. Leptonai

Per tris paskutiniuosius gyvenimo dešimtmečius Albertas Einšteinas daug dirbo kurdamas vieningąją lauko teoriją [15]. Kai jis pradėjo šį darbą, buvo žinoma tik dvejopa sąveika — elektromagnetinė ir gravitacinė. Jas, žinoma, mokslininkas ir norėjo suvienyti. Vėliau buvo atrasta taip pat silpnoji ir stiprioji sąveikos, bet, kiek man žinoma, Einšteinas visai nemėgino aprėpti savo vieningąja teorija visų rūšių sąveikas. Einšteino darbas, kuriant vieningąją lauko teoriją, nepriklausė nė vienai tuomet madingai darbų krypčiai, be to, ir nebuvo sėkmingas pragmatiniu požiūriu. Todėl, kaip neseniai rašė žymus teoretikas Č. Jangas, „kurį laiką daugelis fizikų manė, jog suvienijimo idėja — tai tik įkyri idėja, užvaldžiusi Einšteiną senatvėje... Taip, tai buvo įkyri idėja, bet kilusi giliai perpratus teorinės fizikos fundamentalios struktūros esmę. Ir, aš noriu pridurti, būtent ši idėja yra šiuolaikinės fizikos šerdis".

Iš tikrųjų, vieningoji silpnosios ir elektromagnetinės sąveikų teorija, taip pat „didysis suvienijimas" (grand unification) — vieningoji silpnosios, elektromagnetinės ir stipriosios sąveikų teorija ir, pagaliau, „supersuvienijimas" — visų minėtų sąveikų vieningoji teorija — šiandien labiausiai yra prikaustę fizikų teoretikų dėmesį.

Jau ketvirtajame dešimtmetyje buvo spėjama, kad silpnąją sąveiką perneša tarpiniai vektoriniai *W* bozonai (vektorinės dalelės sukinys lygus vienetui, skaliarinės — nuliui), panašiai kaip elektromagnetinės sąveikos „nešikliais" galima laikyti fotonus. Šia prasme silpnąją ir elektromagnetinę sąveikas galima laikyti iš esmės analogiškomis. Tačiau trukdo dvi labai svarbios aplinkybės. Fotono masė lygi nuliui, ir pačius fotonus mes gerai pažįstame. O tarpinio *W* bozono masė turi būti gana didelė, ir jų iki 1982—83 m. dar nebuvo aptikta (manoma, kad būtent dėl tokio masyvumo jų ir negalima gauti buvusiais greitintuvais: kuo didesnė dalelės masė, tuo didesnės reikia energijos jai gauti). Šiomis sąlygomis tarpinių bozonų teorija atsidūrė panašioje padėtyje, kaip ir daugybė kitų prielaidų ar numatymų, neturinčių solidaus pagrindo. Tačiau 1967 metais buvo sukurta teorija, kurioje fotonai ir *W* bozonai nagrinėjami vieningu požiūriu ir net paaiškinamas jų masių skirtumas.

Vieningoji elektromagnetinės ir silpnosios sąveikų teorija, taip pat „didysis suvienijimas" ir „supersuvienijimas" grindžiami rimtomis idėjomis, susijusiomis su simetrija, apibendrintuoju kalibravimo invariantiškumu ir savaiminiu simetrijos sutrikimu. Nenorint mokslo profanuoti, tokioje glaustoje apžvalgoje turbūt nevertą nė mėginti nušviesti šias idėjas kad ir bendriausiais bruožais.

Vis dėlto reikėtų atkreipti dėmesį į du dalykus. Pirma, silpnosios ir elektromagnetinės sąveikų vieningosios teorijos stipriosios vietos paaiškėjo tik praslinkus keleriems metams nuo jos sukūrimo. Antra, vienas iš esminių šios teorijos teiginių — kad, be elektringų $W^{\pm}$ bozonų, dar egzistuoja vektorinis tarpinis neutralus W^0 bozonas, arba, kaip dabar priimta jį žymėti, Z^0 bozonas. Kaip sako savo žargonu teoretikai, procesai, kuriuose dalyvauja Z^0 bozonai, yra susiję su *neutraliosiomis srovėmis*. Ir štai 1973 metais buvo nustatyta bandymu, kad tikrai esama neutraliųjų srovių, o vėlesniais metais tuo įsitikinta dar tvirčiau. Tai, be abejo, galima laikyti teorijos triumfu. Patvirtina ją ir kiti faktai. Už darbus suvienijant silpnąsias ir elektromagnetines sąveikas 1979 m. S. Vainbergui, Š. Glešou ir A. Salamui suteikta Nobelio premija.

Ir vis dėlto vargu ar esamą elektromagnetinių ir silpnųjų sąveikų teoriją buvo galima laikyti įrodyta, kol neaptikta pačių W^0 bozonų. Elektringųjų bozonų masė, kaip manoma, turėtų būti tarp 77 ir 84 GeV, o neutraliųjų — tarp 88 ir 95 GeV. Gali paaiškėti, kad šios masės yra kitokios, bet nėra pagrindo abejoti, jog jų dydžio eilė būtent šitokia. Vadinasi, *W* bozonus bus įmanoma sukurti jau sekančios kartos greitintuvais *.

Be *W* bozonų, naujosiose teorijose (ypač tose, kur mėginama vieningai nagrinėti drauge silpnąją, elektromagnetinę ir stipriąją sąveikas) įvedama dar kitokių dalelių, tarp jų ir skaliarinių. Deja, kai kurių dalelių masės gali būti milžiniškos — iki 10^{14} GeV ir daugiau. Taigi teks laukti dešimtmečius, jei ne ilgiau, kol paaiškės, ar tokios dalelės egzistuoja. Bet vargu ar tai sutrukdys išspręsti teorijų likimą apskritai — juk neištirtų klausimų ir sričių lieka visada. Tiesa, elektromagnetinės ir silpnosios sąveikų teorijai taip pat būtinas bent vienas skaliarinis bozonas, bet jo masė, kaip spėjama, gali „tilpti“ jau prieinamame energijų diapazone.

Kol negauta konkrečių žinių apie minėtas daleles, teorijos negalime laikyti visai užbaigta, nes netvirti jos pagrindai. O dabar atsirado dar vienas svarbus, bet neaiškus faktas. Iš vieningosios teorijos, kaip dabar ji suprantama, išplaukia, jog dėl silpnųjų ir elektromagnetinių jėgų sąryšio turėtų būti vienas neryškus, bet kokybiškai naujas atomo fizikos efektas. Būtent: neturi išlikti lyginumas elektronų ir nukleonų sąveikoje. Dėl to turi pasisukti šviesos (tam tikro bangos ilgio) poliarizacijos plokštuma, jai praeinant, pavyzdžiui, pro bismuto garus (jei lyginumas nekinta, šio posūkio visiškai neturi būti). Buvo atlikti bandymai — Oksforde (Anglijoje), Siatlyje (JAV), Novosibirske ir Maskvoje. Šiuo metu

* 1983 m. nauju CERN'o (Šveicarijoje) greitintuvu buvo įrodyta, jog egzistuoja $W^{\pm}$ ir Z^0 bozonai. Gautosios jų masės gerai atitiko teoriškai numatytąsias.

anglų ir amerikiečių duomenys atrodo šiek tiek neapibrėžti, Novosibirsko grupės duomenys visiškai patvirtina teoriją, o Maskvos — aiškiai prieštarauja teorijos išvadoms. Kaip gi vertinti šitokią situaciją? Tik šitaip: reikią naujų eksperimentų, kuriuos atliktų kitos grupės. Jei tai, ką numato teorija, pasitvirtins, tai jos horizonte neliks nė vieno debesėlio. O jeigu bus patvirtintas neigiamas rezultatas, tai jis teorijos nesužlugdys, bet turbūt prireiks kažkaip ją modifikuoti. Nespėliosime, palauksime bandymų rezultatų *.

Prie žymių mikrofizikos laimėjimų, pasiektų pastaraisiais metais, reikia priskirti ir dar vieno leptono atradimą. Leptonai — tai dalelės, kurios, kaip ir elektronas bei miu mezonas, stipriai nesąveikauja. Naujojo tau leptono masė — apie 1780 MeV. Greičiausiai šiai dalelei, kaip ir elektronui bei miu mezonui, turi egzistuoti „nuosavas" neutrinas, nors tai įrodoma tik netiesiogiai. O kiek iš viso gali egzistuoti leptonų, dar neaišku; tam tikrų faktų, ribojančių jų skaičių, pateikia kosmologija.

[1] straipsnyje buvo ypač pabrėžta dalelių masių spektro problema — kaip galima numatyti visų egzistuojančių dalelių parametrus (pirmiausia — masę ir sukinį). Ji apskritai dar toli gražu neišspręsta, ypač turint omenyje daleles, „nerandančias vietos" didžiojo suvienijimo ir supersuvienijimo schemose. Tarp tokių hipotetinių dalelių rasime ir tachionus (daleles, judančias greičiau už šviesą), kurių veikiausiai vis tik negali būti, ir maksimonus (daleles, turinčias milžinišką, 10^{-5} g eilės, masę, t. y. maždaug 10^{19} kartų masyvesnes už protoną), ir kitokias daleles, sąveikaujančias vien gravitacinėmis jėgomis.

12. „Didysis suvienijimas". Protono skilimas. „Supersuvienijimas". Neutrino masė

Silpnosios ir elektromagnetinės sąveikų vieningosios teorijos sėkmė ir kartu stipriųjų sąveikų teorijos (chromodinamikos) laimėjimai skatina kurti šių trijų sąveikų vieningą teoriją. Tokio „didžiojo suvienijimo" pagrindu imami šešių tipų „trispalviai" kvarkai ir trijų rūšių leptonai su jų „personaliniais" neutrinais, be to, visų šių dalelių antidalelės. Šios 24 dalelės su savo antidalelėmis, taip pat visa eilė skaliarinių (sukinys 0) ir vektorinių (sukinys 1) bozonų suvienijami draugėn, atsižvelgiant į tam tikrus reikalavimus, keliamus dėl simetrijos ir kalibravimo invariantiškumo. Taip gaunamas „didysis suvienijimas", sudėtingas daugiaplanis teorinis paveikslas, kuriame turi atsispindėti fizikinė realybė. Šis pa-

* 1983 m. Maskvoje ir Oksforde buvo gauta duomenų, sutampančių ir tarpusavyje, ir su teorijos numatytaisiais.

veikslas dar toli gražu neužbaigtas, be to, kuriamas ne vienas jo variantas. Vis dėlto pagrindiniai kokybiniai „didžiojo suvienijimo" rezultatai atrodo natūralūs. Kad tuo įsitikintume, užtenka bendrų samprotavimų. Jeigu jau kvarkai ir leptonai kažkaip „suburiami" draugėn, tai jie, apskritai kalbant, turi virsti vieni kitais ir gali įnešti savo indėlį į visų dalelių masę.

Iš čia išplaukia stulbinantis dalykas — protonas, pasirodo, gali būti nestabilus! Be protono skilimo, kai kurie teorijos variantai numato neutrono virsmą antineutronu ir atvirkščiai (neutrono osciliacijas). Turimi eksperimentų duomenys rodo, kad vidutinė protono gyvavimo trukmė, tikriausiai, ilgesnė kaip 10^{30} metų (priminsime, kad „Visatos amžius" yra 10^{10} metų eilės). „Didžiojo suvienijimo" teorija dar nenurodo tikslios protono gyvavimo trukmės. Yra ir tokių šios teorijos variantų, pagal kuriuos ji — begalinė (protonas stabilus), bet pagal kitus pasiūlytus variantus vidutinė protono gyvavimo trukmė tikrai yra baigtinė, nors ir ilga — 10^{31}—10^{33} metų. Dar tik atliekami bandymai šiai hipotezei patikrinti. Jų idėja šitokia: reikia didžiulio detektoriaus, didžiulės medžiagos masės ir aparatūros protonų skilimams registruoti. Jei tikrai protonai nestabilūs, tai detektorius registruos jų skilimus — tuo dažnesnius, kuo trumpesnė vidutinė gyvavimo trukmė. Žinant visų detektoriuje esančių protonų skaičių ir išmatavus skilimų dažnį, lengva apskaičiuoti ir vidutinę protonų gyvavimo trukmę.

Didžiausiame pastatytame detektoriuje telpa 10^4 tonų vandens, kuriame yra 10^{34} nukleonų — protonų ir neutronų (surišto neutrono skilimo tikimybė tokia pat, kaip ir protono). Jeigu vidutinė protono gyvavimo trukmė 10^{31} metų, tai tame detektoriuje įvyks 1000 skilimų per metus, arba 3 skilimai per parą. Užregistruoti tokius retus skilimus ir ypač išskirti juos iš įvairiausių trukdžių,— sunku, bet iš principo įmanoma. Tačiau, jei vidutinė protono gyvavimo trukmė 10^{33} metų, tai eksperimentais ją nustatyti bus galima turbūt dar negreitai. Vadinasi, jei dabar statomais detektoriais bus aptiktas protono skilimas, „didžiojo suvienijimo" teorija triumfuos. O neigiami pirmųjų eksperimentų rezultatai dar neįrodo, jog protonas stabilus. Jeigu jo gyvavimo trukmė — 10^{33} metų, tai stiprioji, silpnoji ir elektromagnetinė sąveikos susilygina esant milžiniškai energijai — 10^{15}—10^{16} GeV, kurią atitinkanti masė 10^{16} kartų didesnė už protono masę!

Sekantis žingsnis po „didžiojo suvienijimo" (pabrėžiame, kad jis dar toli gražu neužbaigtas) būtų visų sąveikų, tarp jų ir gravitacinės, suvienijimas. Čia jau tektų susidurti su 10^{19} GeV eilės energijomis.

Įvairių sąveikų suvienijimas — vieningoji lauko teorija, apie kurią svajojo Einšteinas,— dabar intensyviai plėtojama. Teorija,

vienijanti elektromagnetinę ir gravitacinę sąveikas, vadinama supergravitacijos teorija. Joje tenka įvesti taip pat daleles (gravitinus), kurių sukinys lygus 3/2. Sudaryta ir dar bendresnė „supersuvienijimo" schema, apimanti visas žinomas sąveikas.

Iš neutrino ryšio su kitomis dalelėmis, atspindinčio jų „suvienijimą", išplaukia, kad neutrino rimties masė apskritai nėra lygi nuliui, be to, elektroninio, miuoninio ir tau neutrinų rimties masės gali skirtis. Iš šiandien esamos teorijos dar negalima apskaičiuoti, kokio didumo toji neutrino rimties masė, o jeigu ir būtų įmanoma apskaičiuoti,— vis tiek reikėtų ją patikrinti eksperimentais. Ši problema nenauja. Anksčiau neutrino rimties masė buvo laikoma lygia nuliui tik dėl dviejų priežasčių. Pirma, žinota iš bandymų, kad toji masė gerokai, bent 1000 kartų, mažesnė už lengviausios dalelės — elektrono masę. Antra, neutrino masę laikant lygia nuliui, gaunama paprastesnė ir darnesnė teorinė schema, negu tarus ją esant nenulinę. Tačiau buvo aišku, kad šių argumentų neužtenka, ir buvo bandoma nustątyti neutrino masę. Prieš keletą metų tarybinių fizikų grupė gavo rezultatus [16], rodančius, jog ji lygi ne nuliui, o maždaug 35 eV (15 tūkstančių kartų mažesnė už elektrono masę). Neseniai panašūs bandymai buvo atlikti dar tiksliau (taip mano jų autoriai), ir pareikšta, jog neutrino masė turi būti tarp 14 ir 46 eV. Aišku, bandymus reikia tęsti, ir būtinai keliose laboratorijose.

Kiti mokslininkai yra priėję išvadą, kad neutrino masė nelygi nuliui, analizuodami galimas neutrino osciliacijas — elektroninio neutrino „virsmus" kitų „rūšių" neutrinais ir priešingai. Jeigu vyksta tokios osciliacijos, tai skirtingų neutrinų masės skiriasi, vadinasi, bent viena jų nelygi nuliui. Eksperimentiškai osciliacijas galima aptikti remiantis tuo, kad netgi sklindančio vakuume elektroninių neutrinų pluoštelio intensyvumas dėl osciliacijų turi mažėti kintant atstumui. Aptikus osciliacijas, paaiškėtų ir kai kurie dabar nesuprantami Saulės neutrinų detektavimo rezultatai, o tai yra labai svarbu. Jeigu neutrinų masė didesnė kaip 10 eV, tai jie turi didžiulę reikšmę kosmologijai, o jeigu mažesnė kaip 1 eV (visų rūšių), tai čia jų vaidmuo apskritai yra menkas. Tačiau fizikus, suprantama, domina visų rūšių neutrinų masė, kad ir kokia ji būtų. Taigi nustatyti neutrinų masę, be abejo, yra vienas svarbiausių ir aktualiausių mikrofizikos uždavinių.

13. Elementarusis ilgis. Didelės ir superdidelės energijos dalelių sąveika

Elementarusis (fundamentalusis) ilgis — kol kas tik hipotetinė sąvoka, kurią fizikai teoretikai vartoja kai kuriose savo „konstrukcijose", dažniausiai — analizuodami mikropasaulį. Paprasčiausiai elementarųjį ilgį galėtume įsivaizduoti kaip mažiausią atstumą, mažiausią mastelį, kuriame dar yra teisingi mums žinomi gamtos dėsniai. Už to slenksčio, tai yra mažesniuose už elementarųjį ilgį atstumuose, tie mums žinomi gamtos dėsniai turėtų iš esmės netikti,— turėtų, kaip dabar dažnai sakoma, atsirasti nauja fizika [17].

Skaitytojui, kaip reikiant nepasirengusiam (o gal geriau pasakytume,— netreniruotam) gilintis į teorinę fiziką, bus tikrai nelengva suvokti tokią sudėtingą sąvoką, kaip elementarusis ilgis — šis savotiškas erdvės kvantas. Tačiau panašius sunkumus tenka įveikti ir susipažįstant su kitomis šių dienų fizikos sritimis, ypač su kvantine mechanika ir reliatyvumo teorija [18, 19].

Elementariojo ilgio problema atsirado tiek iš bendrų samprotavimų, pradėtų Rymano ir Einšteino, tiek iš „praktinių" teorinės fizikos poreikių, būtent: kaip „ištaisyti" ar bent jau „apeiti" atsiradusius teorijoje diverguojančius, t. y. neaprėžtai didėjančius, dydžius? Daugiausia tokie diverguojantieji dydžiai atsiranda įvairiose teorinėse išraiškose, kai jos taikomos vis trumpesnėms bangoms („ultravioletinė katastrofa").

Dabartinė reliatyvistinė kvantinė lauko teorija daleles laiko materialiais taškais, neturinčiais matmenų. Todėl nėra kokio nors natūralaus ilgio, ribojančio bangų spektrą, ir diverguojančių dydžių, regis, neįmanoma išvengti. Tačiau dar klasikinėje fizikoje buvo išmokta daugmaž „sutramdyti" kai kuriuos divergavimus, kaip sakoma, „pernormuojant" mases. Pavyzdžiui, elektringos dalelės judėjimo lygtyje tam tikrų mechaninės ir elekromagnetinės masių suma pakeičiama eksperimentiškai nustatyta dalelės mase.

Svarbiausias kvantinės elektrodinamikos pasiekimas per penktąjį ir šeštąjį dešimtmetį buvo tai, kad buvo nuosekliai „pernormuoti" visi diverguojantieji reiškiniai, pasitelkus trikdymų (perturbacijų) teoriją. Taip buvo sukurta teorija, visiškai atitinkanti eksperimentų rezultatus. Tačiau eksperimentinių duomenų gaunama tik kol ilgiai ne mažesni kaip maždaug 10^{-16} cm (atitinkama energija — 100 GeV eilės, o laiko intervalas — maždaug $3 \cdot 10^{-27}$ s). Taigi galima tvirtinti, kad iki 10^{-16} cm atstumų jokio elementariojo ilgio nėra, į erdvę galime žiūrėti, kaip mums įprasta. Anksčiau gana plačiai buvo nurodoma nepernormuotų išraiškų taikymo riba — 10^{-17} cm. Be kitko, šią ribą (10^{-17} cm), iš esmės ir laikytiną elementariuoju ilgiu, reikėjo įvesti silpnųjų sąveikų teo-

rijoje, kol ji nebuvo suvienyta su elektrodinamika. Tačiau dabar sukurta vieninga silpniosios ir elektromagnetinės sąveikų teorija, kuri yra pernormuota, ir neapréžtai didėjančių dydžių čia nebeliko (tai ir yra vienas svarbiausių šios teorijos laimėjimų). Vadinasi, jau nėra realaus pagrindo 10^{-17} cm elementariajam ilgiui įvesti.

Tai teoretikus taip įkvėpė, kad jie praktiškai suvis pamiršo apie elementarųjį ilgį ir drąsiai darbuojasi su 10^{-29}—10^{-30} cm eilės dydžiais, netgi eina iki vadinamojo gravitacinio (Planko) ilgio — 10^{-33} cm. Pastarasis šiandien iš esmės ir vaidina elementariojo ilgio vaidmenį. Toks požiūris išmintingas ir pagrįstas, nes nėra jokių realių prielaidų didesniam nei 10^{-33} cm elementariajam ilgiui įvesti. Bet vis dėlto negalima pamiršti, kad įprastinius erdvės ir laiko vaizdinius, patikrintus iki 10^{-16} cm atstumu, „paliekame kaip buvusius" dar net per 17 dydžio eilių — ekstrapoliuojame iki tam tikrais samprotavimais pagrįsto 10^{-33} cm atstumo. Fizikai apskritai būdingi tokie drąsūs ekstrapoliavimai. Štai kitas pavyzdys: tariama, kad dėsniai, nustatyti Žemės laboratorijose, yra tie patys visoje Visatoje, išskyrus artimas „pradiniam singuliarumui" sritis (plačiau apie tai bus pasakojama astrofizikos skyriuje). Jei vis dėlto egzistuotų elementarusis ilgis, didesnis negu 10^{-33} cm, tai dėl to gerokai turėtų pasikeisti visa fizika — ne tik mikrofizika, bet ir, sakysime, požiūris į mini juodąsias skyles, į kosmologiją.

Štai kodėl elementariojo ilgio problemos negalima išbraukti iš svarbiausiųjų fizikos bei astrofizikos problemų sąrašo.

O dalelių, turinčių didelę ir superdidelę energiją, sąveika — viena iš amžinųjų problemų. Keičiasi tik konkrečiu laikotarpiu pasiekiama energijos riba. Prieš dešimtmetį greitintuvai suteikdavo protonams energiją iki 75 GeV (Serpuchovo), o dabar — jau 500 GeV (Batavijos, JAV). Toliau pažengti daugiausia tikimasi, leidžiant susidurti priešpriešiais judantiems dalelių pluoštams. Toks greitintuvas jau veikia CERNe, protonų energija kiekviename pluošte čia siekia 270 GeV, o tai tas pat, kaip „šaudyti" į nejudamą taikinį apie 10^5 GeV energijos protonais. Netrukus (po metų kitų) turėtų būti paleistas toje pačioje Batavijoje greitintuvas, kuriame judės priešpriešiais pluoštai protonų (arba protonų ir antiprotonų), įgreitintų iki 1000 GeV energijos. O tai atitinka laboratorinėje atskaitos sistemoje (kai dalelė atsimuša į nejudantį taikinį) protonų energiją, lygią $2 \cdot 10^6$ GeV. Tarybų Sąjungoje pradėtas statyti greitintuvas, kuriame susidurs maždaug 3000 GeV energijos protonų pluoštai — laboratorinėje atskaitos sistemoje tų protonų energija jau būtų $2 \cdot 10^7$ GeV. Suteikti greitintuvuose dar daug didesnes energijas vargu ar pavyks iki šio amžiaus pabaigos. Vadinasi, dar nebus galima tyrinėti greitintuvais erdvę mažesniu kaip $5 \cdot 10^{-18}$ cm masteliu, kad ir ieškant elementariojo ilgio.

Kosminiuose spinduliuose yra net 10^{11} GeV energijos dalelių, bet jų labai mažai. O štai 10^{9} GeV energijos dalelių jau yra tiek, kad įmanoma jas stebėti, nors taip pat mažai — į 1 km^2 plotą jų pataiko apie šimtinę per metus. 10 000 kartų daugiau ateina pas mus pirminių dalelių, kurių energija 10^{7} GeV. Todėl didelių energijų fizikos tyrimams 10^{7}—10^{9} GeV srityje visai realu panaudoti kosminius spindulius. Toks įrenginys statomas Armėnijoje ant Aragaco kalno. Jei fizikai tyrinėjimams su tokių energijų dalelėmis, kokių dar negauna greitintuvuose, nepasinaudotų kosminiais spinduliais,— būtų mažų mažiausiai trumparegiai. Na, teisingiau būtų juos apkaltinti snobizmu, kuris gana paplitęs mokslo sferose. Šiaip ar taip, visa didelių energijų fizikos istorija byloja apie kosminių spindulių naudingumą, ir ateityje, manau, tuo vėl įsitikinsime.

14. *SL* invariantiškumo pažeidimas. Netiesiniai reiškiniai vakuume superstipriuose magnetiniuose laukuose. Keletas pastabų apie mikrofizikos raidą

„Išversime" *SL invariantiškumo* sąvoką: *S* — *krūvinė sąsaja*, *L* — lyginumas, o invariantiškumas — nekintamumas. Pati ši sąvoka atspindi tam tikrą branduolinių procesų ypatumą, kurį laisvai galėtume apibūdinti šitaip: procesas vyks visai taip pat, jeigu visas daleles pakeisime jų antidalelėmis ir kartu „dešininę", koordinačių sistemą pakeisime „kairine". *SL* invariantiškumas būdingas visiems žinomiems procesams, išskyrus vieną gana retą neutraliojo *K* mezono (K^0) skilimą [18]. Betgi išimtis yra, ir tai skatina susidomėti problema.

[1] straipsnyje *SL* invariantiškumo sutrikimui buvo skirtas visas skirsnis. Ši problema ir dabar svarbi, apskritai dar neišspręsta, bet ji tik viena iš daugelio įvairių problemų, kurias gvildena *kalibravimo teorijos*. Prie jų taip pat priskiriamos problemos, susijusios su netiesiniais reiškiniais vakuume stipriuose laukuose.

Šis uždavinys anaiptol ne naujas — fizikai su juo susidūrė ketvirtojo dešimtmečio pradžioje. Būtent tada jie suprato, kad stipriuose laukuose — elektriniame lauke, kurio stiprumas apie $3 \cdot 10^{16}$ V/m, ir magnetiniame lauke, kurio stiprumas apie 10^{14} Oe,— vakuumas elgiasi lyg kažkokia netiesiška terpė. Be to, pakankamai stipriame elektriniame lauke gali gimti elektronų ir pozitronų poros. Tačiau ilgą laiką apie tokius superstiprius laukus buvo galima tik svajoti, ir buvo vien teorinė hipotezė, kurią nelabai ir tikėtasi kada nors patikrinti eksperimentais. Padėtis pasikeitė, atradus pulsarus (besisukančias įmagnetintas neutronines žvaigždes), kurių paviršiuje laukas gali būti panašaus stiprumo, kaip aukščiau nurodyta (10^{14} Oe), arba, tiksliau sakant, tik viena ar dviem eilėmis

silpnesnis. Be to, paaiškėjo, kad didelės energijos dalelės gali pagimdyti e^+e^- poras elektriniame lauke, kurio stiprumas daug kartų mažesnis nei $3 \cdot 10^{16}$ V/m. Superstiprūs elektriniai laukai yra atomuose arti branduolio. Visa tai, be abejo, paskatino labiau susidomėti netiesiškumo vakuume stipriuose laukuose problema, ją išskirti.

Apskritai mikrofizikoje paskiros temos bei problemos yra vienaip ar kitaip glaudžiau tarp savęs susijusios negu makrofizikoje ir astrofizikoje. Tai, beje, suprantama: daugelis mikrofizikos šakų dar palyginti jaunos, nespėjo labai viena nuo kitos nutolti. Šiame skyriuje pateiktas problemų sąrašas — gana sąlygiškas, lengvai galėtume jį pakeisti, detalizuoti, papildyti. Visai nebuvo paminėta, pavyzdžiui, pioninė kondensacija — hipotetinis reiškinys, dėl kurio turėtų susidaryti supertanki medžiaga atomų branduoliuose, o gal ir kai kuriose žvaigždėse. Nekalbėjome nei apie smūgines bangas, kurios atsiranda susidūrus sunkiesiems branduoliams, nei apie tai, kas vyksta medžiagoje esant „supertemperatūrai", nei apie magnetinių monopolių (vienpolių magnetų) problemą, nei apie vakuumo sąvokos fizikinį turinį [20], ypač nestacionariomis sąlygomis. O dalį išvardytųjų problemų po kurio laiko turėsime priskirti ne vien fizikai, bet ir (netgi labiau) astrofizikai. Jau dabar taip „pakeitė adresą" Visatos barioninės asimetrijos problema (kodėl Visatoje dalelių yra nepalyginamai daugiau negu antidalelių?), fizikinių „konstantų" kintamumas.

Tokie „peradresavimai", be abejo, nėra atsitiktiniai. Fizika ir kosmologija visada buvo susiję mokslai, bet dabar jų ryšys pasidarė itin glaudus ir abipusis. Žinoma iš ankstesnio pasakojimo, kokie svarbūs fizikai 10^{-29}—10^{-30} cm eilės atstumai ir 10^{15}—10^{16} GeV eilės energijos. Tačiau nei tokie atstumai, nei tokios energijos laboratorinei fizikai šiandien nėra prieinamos. Vienintelės „vietos", kur medžiaga apibūdinama šitokiais dydžiais,— tai įvairios Visatos evoliucijos stadijos. Priminsime: $3 \cdot 10^{-30}$ cm atstumus atitinka 10^{80} g/cm^3 tankis, o vadinamasis Planko tankis, atitinkantis 10^{-33} cm atstumus, lygus 10^{94} g/cm^3. Žinoma, fizikus labai domina ir kur kas mažesni tankiai, kurie vis dėlto gerokai didesni už branduolinės medžiagos tankį $3 \cdot 10^{14}$ g/cm^3, bet ir apie tokias medžiagos būsenas galime gauti žinių tik iš kosmologijos.

Atskirų mokslo krypčių pažanga nebūna tolygi. Esti audringi metai, net dešimtmečiai, o būna ir sustingimo, net pakrikimo periodai. Ypač tai pasakytina apie mikrofiziką, nes ši mokslo sritis, kaip čia ją apibrėžiame ir suprantame,— visada priekyje, priešakinėse pozicijose. Manau, visi sutiks, kad šį šimtmetį ryškiausio mikrofizikos raidos laikotarpio būta tarp 1924—1925 ir 1930—1932 metų. Per tą laiką buvo sukurta, beveik išvystyta ir suprasta

nereliatyvistinė kvantinė mechanika, padėti reliatyvistinės teorijos pagrindai. Be to, 1932 metais atrasti pozitronas ir neutronas, o 1931 metais paskelbta neutrino hipotezė.

Bet tolesniame kelyje ėmė rastis kliuvinių. Svarbiausias kliuvinys buvo atsiradę diverguojantieji (t. y. neaprėžtai didėjantys) matematiniai reiškiniai. Jie trukdė plėtotis netgi elektrodinamikai, jau nekalbant apie gimstančias silpnosios ir stipriosios sąveikų teorijas. Patyrė sunkumų ir dalelių, kurių sukinys didesnis kaip 1/2 (t. y. lygus 1, 3/2, 2 ir t. t.), reliatyvistinė teorija.

Nėra nei instrukcijų, nei vadovų, skinantis kelią į neišžvalgytą sritį. Čia veikiama bandymų ir klaidų metodu. Laimi tas, kas turi geresnę intuiciją, moka spręsti sudėtingus uždavinius. Beje, ne mažesnį vaidmenį, matyt, vaidina ir sėkmė, atsitiktinumas,— jei kalbame ne apie tokius minties galiūnus, kaip Einšteinas.

Galime prisiminti tyrimų kryptis, nuskambėjusias, pavyzdžiui, pradedant ketvirtuoju dešimtmečiu: nelokalioji lauko teorija, savojo lauko inercijos įskaitymas dalelių su didesniais sukiniais teorijoje, didelio sukinio dalelių reliatyvistinė lygtis; pernormavimų metodas kvantinėje elektrodinamikoje; aksiominis metodas; *S* matricų metodas (neigiant Lagranžo ir Hamiltono lygčių svarbą), redžistika. . . . Iš visų jų pasiekta svarių laimėjimų (baigiantis penktajam dešimtmečiui) tiktai elektrodinamikoje, pritaikius pernormavimų metodą. Rezultatai buvo puikūs, bet teoretiko akimis — šiek tiek „techniški" ir riboti. Vis dėlto norėtųsi turėti teoriją, nesaistomą jokių pernormavimų ir, pagaliau, neapsiribojančią elektrodinamika. Iš kitų mėginimų (be pernormavimo) neverta daug tikėtis. Kai kurie jų visada atrodė stokoją idėjų „užtaiso", o, anot rusiškos patarlės, „iš tuščio lizdo žvirblis neišskris".

[Šios pastabos gali būti suprastos klaidingai. Iš tiesų, kaip jau buvo pabrėžta, skverbiantis į nežinomą sritį, vien sėkmė parodo, kad kelias pasirinktas teisingai. Todėl niekas negali išties kompetentingai iš anksto skelbti, yra ar nėra ieškojimuose vertingų idėjų. Ir vis dėlto, atsiradus naujai hipotezei ar pasiūlymui, kiekvienas juo susidomėjęs stebėtojas intuityviai vienaip ar kitaip pats ją įvertina, kai ką prognozuoja. Vėliau toks stebėtojas, žinoma, džiaugiasi, jei paaiškėja, kad jis buvo teisus, ir kremtasi suklydęs. Tik šitokia prasme autorius ir drįsta reikšti savo pastabas, vertinimą. Aš, pavyzdžiui, gailiuosi, kad neįvertinau laiku kvarkų hipotezės, ir džiaugiuosi, kad teisingai pajutau (o gal tik nuspėjau?), jog nebus vaisingi kai kurie mėginimai sukurti naują teoriją. O ką galima pasakyti apie pernormavimų metodą, taikytą dalelėms jau kadaise, klasikinėje elektrodinamikoje? Kai kurie fizikai (gal netgi dauguma) jį laiko visai patenkinamu. Bet rasime literatūroje ir santūresnių (kaip ir šiame straipsnyje) požiūrių į pernormavimus.]

Priešingai, tai, kas daroma šiandien, nors ir nevisiškai nauja, bet grindžiama daugybe naujų idėjų. Žengta į naują pakopą, gvildenant medžiagos sandarą (kvarkai, gliuonai ir kt.). Yra pasiekusi tikrų laimėjimų silpnųjų ir stipriųjų sąveikų teorija. Kontrastas toks ryškus, kad iš karto patraukia dėmesį. Todėl ir galima, netgi stebint iš šalies, išaukštinti paskutiniuosius mikrofizikos laimėjimus. Dabartinis laikotarpis netrukus iš tiesų gali būti pripažintas tokiu pat reikšmingu fizikos istorijai, kaip kad aukščiau minėtasis kvantinės mechanikos kūrimo laikotarpis.

Beje, ir būdami šitaip nusiteikę, negalime pamiršti, kad dar anksti kalbėti apie kokią nors užbaigtą vieningąją sąveikų teoriją. Kaip jau buvo pabrėžta, tai pasakytina net apie elektromagnetinės ir silpnosios sąveikų bendrą teoriją. O jau kvantinės chromodinamikos, „didžiojo suvienijimo" ir „supersuvienijimo" neužbaigtumas dar akivaizdesnis, ir čia dar gali būti staigmenų. Tuo įdomiau bus sekti tolesnius įvykius — tiek teorinės, tiek eksperimentinės mikrofizikos.

ASTROFIZIKA

Septintasis dešimtmetis, kaip buvo rašyta [1] straipsnyje, pagarsėjo itin svarbiais astronomijos atradimais. Užtenka prisiminti kvazarus, reliktinį spinduliavimą (išlikusias iki mūsų dienų elektromagnetines bangas, išspinduliuotas kažkada ankstyvoje Visatos raidos stadijoje [3, 26, 27]), Rentgeno „žvaigždes", kosminių mazerių spindulius, skleidžiamus kai kurių molekulių, ir, pagaliau, pulsarus. Žinoma, yra šioje atradimų virtinėje tam tikro atsitiktinumo, bet vis dėlto šitokį gausų derlių pavyko surinkti todėl, kad šalia optinės atsirado ir kitokių bangų astronomija.

Praėitą, aštuntąjį dešimtmetį astronomija ir toliau įspūdingai plėtojosi, ir nėra pagrindo apgailestauti, esą jos raida sulėtėjusi. Tiesa, svarių atradimų mažiau. Į vieną gretą su septintojo dešimtmečio atradimais galime statyti gal tik Rentgeno pulsarų dvinarėse žvaigždžių sistemose, taip pat Rentgeno ir gama spindulių pliūpsnių atradimus [29]. Daug nuveikta ir teorinėje kosmologijoje, ypač remiantis mikrofizika, naujais jos pasiekimais. Vertas ypatingo dėmesio svarus teorijos laimėjimas — juodųjų skylių garavimo išaiškinimas.

„Astrofizikos" skyrius skiriasi nuo „Mikrofizikos" ir netgi nors ne taip ryškiai, nuo „Makrofizikos" skyriaus tuo, kad pagrindinių problemų sąrašas, pateiktas antraštėse, po dešimtmečio beveik nepakitęs — teko pridėti tik dvi: „Juodųjų skylių fizika" ir „Galaktikų susidarymas". Dabar aš ir pats nelabai suprantu, kodėl [1] straipsnyje juodosios skylės tiesiogiai net nepaminėtos. Tai, žino-

ma, neapsižiūrėjimas, bet daugmaž atspindintis tada buvusį požiūrį į juodąsias skyles. Apskritai nelabai suprantama, kodėl šia svarbia problema buvo susidomėta vis dėlto pavėluotai — juk remiantis bendrąja reliatyvumo teorija juodosios skylės buvo išnagrinėtos 1939 metais, o ikireliatyvistinės fizikos rėmuose apie jų egzistavimą pradėta svarstyti dar XVIII amžiuje (paprastai nurodoma kad juodosios skylės sąvoką įvedęs Laplasas 1796 metais, nors dar anksčiau, 1783 metais, ją vartojo Mičelis).

15. Bendrosios reliatyvumo teorijos tikrinimas eksperimentais

Bendroji reliatyvumo teorija (BRT) eksperimentais tikrinama bent jau nuo 1919 metų: tada pirmą kartą pavyko išmatuoti šios teorijos numatytą šviesos spindulių nuokrypį Saulės gravitaciniame lauke. Tačiau BRT vis dar tikrinama, ir nepasakyčiau, kad jau pasiekta įspūdingo tikslumo,— beje, dėl gerai žinomos priežasties: Saulės sistemos ribose gravitacinis laukas yra palyginti silpnas. Atliktų tikrinimų rezultatai visiškai atitinka tą teoriją, o tikslumas (teisingiau — paklaida) paprastai nurodomas apie 1%. Yra dvi išimtys: dažnio gravitacinio poslinkio matavimas maždaug 0,01% tikslumu ir dar svarbesnis ryšio su dirbtiniais Marso palydovais signalų vėlavimo matavimas maždaug 0,1% tikslumu.

Štai vienas iš BRT efektų, kuriuos galima stebėti net ir silpnuose gravitaciniuose laukuose: didelės masės (žvaigždės, galaktikos) veikia arti praeinančias elektromagnetines bangas panašiai kaip lęšiai. Tokio gravitacinio lęšio apskaičiavimą buvo paskelbęs Einšteinas 1936 metais, o 1979 metais buvo pareikšta prielaida, jog dvinaris kvazaras 0957+561 A, B iš tikrųjų yra du vieno kvazaro atvaizdai, o gravitacinio lęšio vaidmenį čia atlieka elipsinė galaktika, esanti maždaug pusiaukelėje tarp mūsų ir kvazaro [28]. Dabar jau neabejojama, kad tai tiesa. Šis ir panašūs tyrimai reikalingi, žinoma, ne BRT tikrinti (silpnuose laukuose ji jau patikrinta kur kas tiksliau), o vertingai astronomijos informacijai gauti.

O kaip įmanoma patikrinti BRT stipriuose gravitaciniuose laukuose? Šiuo požiūriu mokslininkus domina neutroninės žvaigždės (jų paviršiuje gravitacijos laukas šimtus tūkstančių kartų stipresnis negu Saulės sistemos ribose), o labiausiai — juodosios skylės. Jau pats jų atradimas patvirtintų, bent kokybiškai, kad BRT yra teisinga ir stipriuose laukuose. O kiekybiniai matavimai arti juodųjų skylių padėtų detaliai patikrinti bendrąją reliatyvumo teoriją.

Patikrinti BRT stipriuose gravitacijos laukuose — svarbus ir aktualus uždavinys. Beje, fizikai ir astronomai, dar nesulaukę patikrinimo, drąsiai taiko BRT ir stipriuose laukuose (bet tokiuose, kur kvantiniai efektai dar silpni). Tokia taktika, būdinga teorinei

fizikai,— visai protinga. Ji nė kiek neprieštarauja siekimui „turėti patikimą užnugarį“ — pripažinimui, jog būtina ir toliau patikrinti BRT, ypač stipriuose laukuose.

16. Gravitacinės bangos

Kad *gravitacinės bangos* tikrai egzistuoja, įrodė Einšteinas savo bendrąja reliatyvumo teorija daugiau nei prieš šešiasdešimt metų. Tačiau niekam lig šiol nepavyko jų aptikti. Tai puikus pavyzdys tokių mokslinių problemų, kurių, nors aiškiausiai suvokiamų, nepavyksta išspręsti dešimtmečius. Tiesa, straipsnyje [1] buvo minimas darbas, kuriame reiškiama nuomonė, esą jau užregistruoti kosminiai gravitaciniai spinduliai. Deja, tie stebėjimai nepasitvirtino. Dabar galime tikėtis, jog po kelerių metų stos rikiuotėn gravitacinės antenos, kurios, regis, galės priimti gravitacinių bangų pliūpsnius, pirmiausia ateinančius iš supernovų, įsižiebiančių ne tik mūsų Galaktikoje, bet ir kitose palyginti artimose galaktikose [22]. Pastaroji aplinkybė labai svarbi, nes Galaktikoje supernova įsižiebia vidutiniškai kas 15—20 metų. O registruojant ir jų žybsnius kitose galaktikose, galima tikėtis užfiksuoti po kelis įvykius per metus. Deja, gana neapibrėžtai įvertinama energija, kurią įsižiebianti supernova išspinduliuoja gravitacinėmis bangomis. Tačiau apskritai prognozė gana optimistiška, galima tikėtis, jog jau šį dešimtmetį gims gravitacinių bangų stebėjimais pagrįsta astronomija [21, 23].

Be abejo, gravitacinės bangos gaudomos daugiausia todėl, kad jos būtų naujas kanalas astronomijos informacijai gauti. Bet kad toji informacija būtų suprantama, reikalinga teorija, aprašanti bangų generavimo, sklidimo ir detektavimo procesus. Tokia teorija, galinti iš principo atsakyti į visus klausimus,— tai BRT. Atrodo, čia galima pasikliauti BRT, bet vis tik nedera pamiršti, kad ji dar nepakankamai patikrinta, o šiuo atveju neužtenka vien patikrinimo silpnuose laukuose. Be Einšteino teorijos, t. y. BRT, yra ir kitų, skirtingų gravitacinio lauko teorijų. Pagal jas gravitacinės bangos turėtų elgtis ne taip, kaip nurodo BRT, nors numatomi tų teorijų ir stebimi eksperimentais reliatyvistiniai efektai Saulės sistemoje sutampa. Tačiau yra vienas šiuo atžvilgiu įdomus efektas: dvinario pulsaro PSR 1913+16 orbitos kitimas, regis, patvirtina tokią gravitacinių bangų spinduliavimo hipotezę, kokia išplaukia iš BRT. Tiesa, šį rezultatą dar reikia patvirtinti ir patikslinti, bet apskritai jis svarbus, ir dargi ne vienu aspektu.

Dabar svarbiausia — „pagauti“ kosmines gravitacines bangas. Jeigu tai pavyks, išanalizavus gautuosius duomenis ir nuodugniau ištyrus minėtąjį pulsarą, jau tikriausia bus įsitikinta, jog BRT yra

teisinga (panašiomis sąlygomis), o svarbiausia — bus gauta vertingos astronominės informacijos. Gal nę taip jau ilgai liko laukti pirmųjų rezultatų.

17. Kosmologinė problema

Kosmologinė problema — tai, galima sakyti, šitoks uždavinys: ištirti struktūrą dideliais atstumais ir nustatyti Visatos evoliucijos dėsnį. Atsargumo dėlei susitarsime, kad čia ir toliau kalbėsime ne apie Visatą apskritai, o tik apie vadinamąją Metagalaktiką, t. y. galaktikų sistemą, kurią įmanoma stebėti iš Žemės (į ją įeina ir kvazarai). Tai iš tiesų tik atsargumas, o ne apsidraudėliškumas baiminantis nekvalifikuotų kritikų. Mat Visatos topologija, grubiai sakant, jos „konfigūracija", gali būti ir labai sudėtinga, o mokslininkai nagrinėja dažniausiai tik paprastus modelius: pavyzdžiui, Visatą laiko vidutiniškai (pakankamai dideliu mastu) izotropine ir vienalyte.

Daugelis Visatos raidos modelių grindžiami prielaida, jog kažkada yra buvęs singuliarinis taškas — momentas $t=0$, — kai medžiagos tankis buvo begalinis. Priminsime dar štai ką: jei Visata izotropinė bei vienalytė ir jos tankis didesnis už tam tikrą ribinę vertę ρ_k, tai jos modelis turi būti uždaras, — Visata turi būti išsiplečianti, o vėliau susitraukianti trimatė sfera. O jeigu vidutinis medžiagos tankis mažesnis už ρ_k, tai modelis gaunamas atviras, — Visata plečiasi neribotai. Dabar ribinis tankis ρ_k laikomas lygiu 10^{-29} g/cm^3. Beje, nustatyti tikrąjį vidutinį medžiagos tankį Visatoje nepaprastai sunku. Regimųjų objektų (galaktikų, kvazarų) sudaromas vidutinis medžiagos tankis yra mažesnis už ribinį, taigi atviros Visatos modeliai, regis, priimtinesni. Bet argi tankio vertė nepriklauso dar ir nuo nematomų dedamųjų — silpnai šviečiančių žvaigždžių ir planetų, juodųjų skylių, neutrinų, net gravitacinių bangų? Štai jeigu neutrino masė yra didesnė kaip 10 eV, tai tarpgalaktiniai neutrinai, gimę kadaise, kai Visata dar buvo pakankamai karšta, dabar gali „padidinti" vidutinį jos tankį iki ρ_k ir dar daugiau. O tai reikštų, kad teisingi uždaros Visatos modeliai.

Ir vis dėlto svarbiausia pačios kosmologijos problema — singuliarumas. Vadovaudamiesi BRT — klasikine Einšteino gravitacijos teorija — kažkokį singuliarumą gauname neišvengiamai. Be abejo (bent jau taip mano dauguma fizikų, tarp jų ir autorius), ši išvada rodo teorijos ribotumą: ją būtina apibendrinti, bent jau taikant artimoms singuliarumui sąlygoms. Čia galimi bent trys variantai. Pirmas — gal BRT bus apibendrinta, kad neliktų singuliarumo, dar klasikinės fizikos lygiu. Antras — gali egzistuoti tam tikras elementarusis ilgis (žr. mikrofizikos skyrių). Pagaliau trečias gali-

mas sprendimas pagrįstas tuo, kad BRT taikymą riboja kvantiniai efektai, iš jų išplaukia jau minėti ribiniai dydžiai — elementarusis ilgis $1,6 \cdot 10^{-33}$ cm, laiko intervalas 10^{-43} s ir medžiagos tankis $5 \cdot 10^{93}$ g/cm^3. Peržengus šias vertes, BRT netaikytina, nes būtina atsižvelgti į kvantinius efektus. Dabar daugiausia dėmesio skiriama BRT kvantavimui ir kvantinės kosmologijos kūrimui. Šis tas jau padaryta, ir tai teikia vilties, jog pavyks išvengti singuliarumo, sukurti protingą kosmologinį modelį be singuliarinio taško.

Kosmologija ir juodųjų skylių problema, glaudžiai susijusios su singuliarumo ir BRT taikymo ribų problemomis, užima astronomijoje ypatingą vietą, panašiai kaip mikrofizika — visoje fizikoje. Todėl šios problemos labiausiai traukia dėmesį.

18. Neutroninės žvaigždės ir pulsarai. Juodųjų skylių fizika

Priminsime: jau 1934 metais buvo pradėta svarstyti, ar gali būti neutroninių žvaigždžių ir ar įmanoma jas aptikti, o tos žvaigždės atrastos 1967—1968 metais. Tiksliau sakant, atrasti pulsarai — įsimagnetinusios besisukančios neutroninės žvaigždės, spinduliuojančios stiprias radijo bangas. Tokie pulsarai, išskyrus retas išimtis, yra pavieniai, t. y. nepriklauso stipriau ar silpniau surištoms dvinarėms sistemoms. Aštuntojo dešimtmečio pradžioje buvo atrasti Rentgeno pulsarai, esantys dvinarėse sistemose. Tokioje dvinarėje sistemoje, kurią sudaro neutroninė žvaigždė ir „paprasta" žvaigždė su toli nusidriekusia plazmine atmosfera, plazma gali intensyviai nutekėti į neutroninę žvaigždę. Prie jos artėdama plazma dėl traukos įgyja didžiulį greitį, o paskui, susidūrusi su žvaigžde, labai įkaista (net iki 10^7—10^8 K ir dar daugiau). Tada ji spinduliuoja daugiausia Rentgeno spindulius. Dėl neutroninės žvaigždės sukimosi tie spinduliai yra moduliuoti: gana griežtai periodiškai kartojasi spinduliavimo pliūpsniai ir pauzės (visų pulsarų spinduliavimo visuose diapazonuose periodas — tai jų sukimosi periodas).

Pulsarų dabar žinoma šimtai, o straipsnių apie juos — dar daugiau. Fizikams svarbiausia — tyrinėti pačias neutronines žvaigždes ir jų medžiagą. Tai labai plati ir įdomi tema. Iš jos galima išskirti neutroninių žvaigždžių išorinės plutos tyrinėjimus. Jie ypatingi ne tiek dėl milžiniško plutos tankio, supertakumo ir branduolinių efektų, kiek, svarbiausia, dėl superstipraus magnetinio lauko.

Gerai pamenu, kaip buvo atrasti pulsarai, ir pirmąjį „didvyriškąjį" jų tyrinėjimo periodą. Tada atrodė (bent jau man), kad susigaudyti, koks yra štai šio stebimojo spinduliavimo mechanizmas, bus kur kas lengviau, negu išaiškinti, kas gi tie pulsarai — išsirinkti kurį nors modelį, baltosios nykštukės ar neutroninės žvaigždės.

O išėjo atvirkščiai. Atradus pulsarus, spinduliuojančius didelio dažnio impulsus, baltųjų nykštukių modeliai išsyk atkrito. Remiantis pastebėtais spinduliavimo periodo (vadinasi, ir sukimosi periodo) kitimais ir pasitelkus jau tobulesnę teoriją, pavyko „įsiskverbti" į neutroninių žvaigždžių gelmes. O štai kuriant magnetosferos modelius ir aiškinantis, kaip ji spinduliuoja, iškilo sunkių ir neaiškių klausimų. Tačiau pastaruoju metu jau pastebima pažanga ir galima tikėtis, jog greitai bus sukurtas gan darnus paveikslas.

Rentgeno pulsarai dvinarėse sistemose padeda spręsti uždavinius, labiau būdingus astronomijai, o ne fizikai. Būtent, jie yra patogūs nagrinėti medžiagos pritekėjimui (akrecijai) ir visai žvaigždžių evoliucijai dvinarėse sistemose, kartu ir supernovų įsižiebimui.

Pastaruoju laiku egzotiškiausių astronominių objektų „laurus" pelnė juodosios skylės. Ilgą laiką, ir ne visai aišku kodėl, į jas nebuvo kreipiama daug dėmesio. Žinoma, galime sakyti, kad „dar neatėjo laikas" arba „sunku viską iš karto aprėpti", bet tai dar ne viskas. Viena iš galimų svarių priežasčių — nežinota, jog dėl medžiagos akrecijos į juodąją skylę iš principo įmanoma ją aptikti — priimti tos krintančios medžiagos spinduliavimą.

Tyrinėti juodąsias skyles svarbu dėl daugelio priežasčių.

Pirma (apie tai jau buvo minėta 15 skirsnyje) arti juodųjų skylių yra ypač stiprus gravitacijos laukas, o pats faktas, kad jos gali egzistuoti, išplaukia iš BRT. Todėl atrasti ir ištirti juodąsias skyles yra užvis svarbiausia, norint patikrinti BTR ir atmesti kai kurias alternatyvines *reliatyvistines* gravitacijos teorijas. Žodį „atmesti" pavartojau, žinoma, bent kiek tendencingai: esu BRT šalininkas ir abejoju, ar pakeis ją stipriems laukams kokia nors kita teorija. Tačiau vis dėl to tokių teorijų esama. Nors ne visada įrodomas jų neklaidingumas ir vidinė darna, būtų, manau, neteisinga patikėti be įrodymo, jog juodosios skylės tikrai gali egzistuoti.

Antra, juodosios skylės, kaip paaiškėjo, anaiptol nėra absoliučiai juodos įprastine šio žodžio prasme. Paprastai juodaisiais vadiname tokius kūnus, kurie nešviečia, nespinduliuoja. Ir *kolapsavęs* kūnas, kaip išplaukia iš BRT, ničnieko negali spinduliuoti: bet kokias krintančias elektromagnetines bangas, daleles ar kūnus juodoji skylė „praryja", o iš jos niekas neišlekia. Šiomis savybėmis ji primena žinomą juodojo kūno modelį — nedidelę angelę į didelę uždarą ertmę. Jeigu ertmės sienelės sugeria spindulius ir (arba) yra šiurkščios, tai patekęs pro angelę šviesos spindulys praktiškai neturi šansų ištrūkti išorėn. Todėl angelė atrodo kaip absoliučiai juodas kūnas moksline šio termino prasme (kaip kūnas, sugeriantis visus į jį krintančius spindulius).

Tačiau dabar gerai žinoma, kad absoliučiai juodas kūnas, kurio temperatūra aukštesnė už absoliutinį nulį, skleidžia šiluminius spin-

dulius. Jo spinduliavimo galia proporcinga temperatūros ketvirtajam laipsniui, todėl, krintant temperatūrai, staigiai mažėja. Absoliutinio nulio temperatūroje šio spinduliavimo neliktų. Pagal BRT (priminsime dar kartą, kad BRT mes vadiname klasikinę Einšteino gravitacijos teoriją) juodoji skylė ne tik viską sugeria, bet ir nič-nieko nespinduliuoja, t. y. elgiasi kaip absoliutinio nulio temperatūros juodasis kūnas. Tačiau 1974 m. buvo išaiškinta (analizuojant teoriškai), kad, atsižvelgus į kvantinius efektus, juodoji skylė turėtų spinduliuoti tarsi ne nulinės temperatūros juodasis kūnas.

Juodųjų skylių, kurių masė — kaip žvaigždžių, spinduliavimo temperatūra visai žema (pavyzdžiui, juodosios skylės masė $M \approx \approx 2 \cdot 10^{33}$ g, t. y. kaip Saulės, o jos temperatūra — apie 10^{-7} K). Taigi jas galima laikyti klasikinėmis — nespinduliuojančiomis. Tačiau iš principo galėtų būti ir juodųjų „mini" skylių, kurios turėtų spinduliuoti intensyviai ir net labai intensyviai. Pavyzdžiui, juodoji skylė, kurios masė apie $2 \cdot 10^{15}$ g, t. y. milijardą milijardų kartų mažesnė už Saulės masę (ir vis tik ne tokia jau maža — 2 milijardai tonų!), turėtų visiškai „išgaruoti" per 10 milijardų metų.

Jokio kelio mini juodosioms skylėms atsirasti mūsų epochoje nežinoma, bet iš principo jų galėjo atsirasti ankstyvosiose Visatos evoliucijos stadijose. Tokios reliktinės mini skylės, turėjusios mažesnę kaip 10^{15} g masę, iki mūsų laikų jau būtų išnykusios, bet šiek tiek masyvesnes dar būtų galima aptikti daugiau ar mažiau intensyviai garuojančias. Tokių objektų jau buvo ieškoma ir turbūt tebeieškoma, bet kol kas nesėkmingai. Kartais būna sunku nurodyti vieną priežastį, kodėl gi neaptinkama kokio nors reiškinio. Šiuo atveju, jei mokslininkai neaptiks mini skylių „garavimo" (spinduliavimo), tai dar nebus įrodyta, jog BRT klaidinga,— tų skylių galėjo nė neatsirasti.

Trečia, tokių masių, kaip žvaigždės, ir dar masyvesnės juodosios skylės gali būti itin svarbios astronomijai. Šalta žvaigždė, kurios masė 2—3 kartus didesnė už Saulės masę, jei BRT teisinga, negali būti pusiausvyros būsenoje (baltoji nykštukė arba neutroninė žvaigždė) — ji turi kolapsuoti ir virsti juodąja skyle. Todėl juodųjų skylių, regis, turėtų būti gana tanku. Jas iš principo įmanoma pastebėti dėl dviejų efektų. Dideliame atstume juodosios skylės gravitacijos laukas yra toks pat kaip ir paprastos žvaigždės, vadinasi, dvinarėje sistemoje jis veikia antrosios žvaigždės judėjimą. Be to, juodosios skylės „įsiurbiamos" dujos, prieš į ją nukrisdamos, sudaro besisukantį diską, ar bent jau ne iš karto patenka į juodosios skylės vidų. Tą įkaitusią ir veikiausiai įmagnetintą plazmą, supančią juodąją skylę, galima pastebėti, nes ji spinduliuoja.

Vadinasi, įmanoma aptikti juodąsias skyles. Tačiau ligi šiol patikimų rezultatų nėra gauta, nors mokslininkai atkakliai darbuo-

jasi jau daug metų (tiksliau sakant, beveik dešimtmetį). Tiesa, rastas neblogas „kandidatas" į juodąsias skyles — Rentgeno spindulių šaltinis Gulbės X-1. Stebėjimų duomenys nepaneigia spėjimo čia esant juodąją skylę, bet ir neįrodo, nes galima ir alternatyviai paaiškinti stebimuosius reiškinius. Susidaro įspūdis, kad juodosios skylės bent jau retenybė tarp žvaigždžių. Jei taip ir yra, o BRT teisinga, tai paaiškinimo reikia ieškoti juodųjų skylių susidarymo mechanizme.

Žvaigždė gali baigti savo kelią ketveriopai: susprogti, kad nieko neliktų, virsti baltąja nykštuke, virsti neutronine žvaigžde ir, pagaliau, tapti juodąja skyle. Gali būti (šią prielaidą patvirtina ir kai kurie spaudoje paskelbti skaičiavimai), kad perėjimui būtent į juodąją skylę reikalingas retas aplinkybių ir parametrų derinys.

Be artimos žvaigždėms masės (iki šimtąkart masyvesnių už Saulę) juodųjų skylių, ne kartą buvo diskutuota ir apie masyvias bei supermasyvias juodąsias skyles. Kur tik jos nebuvo „apgyvendinamos": kamuoliniuose spiečiuose, normalių galaktikų branduoliuose, aktyviųjų galaktikų ir kvazarų branduoliuose. Jų entuziastus pradėta net pravardžiuoti „juodaskylininkais". Nė pats nežinau kodėl, bet aš nesu „juodaskylininkas", gal todėl, kad nepalankiai nuteikia kitų susižavėjimas, ir prisidedu prie mėginančių apseiti be juodųjų skylių, bent jau kai kuriais atvejais. Bet tai anaiptol ne tas pats, kas kai kurių mokslininkų reiškiamas juodųjų skylių „nepripažinimas", tendencingas jų laikymas nepageidautina BRT išvada ir pan. Priešingai, gravitacinis kolapsas ir juodosios skylės — viena iš įdomiausių, ir, be abejo, gražiausia (toks terminas fizikoje, žinoma, nedraudžiamas) BRT išvada. Aš tik linkęs neprarasti tam tikro atsargumo, ir kol kas tokia pozicija pasiteisino. Nėra masyvių juodųjų skylių kamuolinių spiečių centre, nėra jų, tikriausiai, ir daugelyje galaktikų. O apie kvazarus ir aktyviuosius galaktikų centrus kalbėsime sekančiame poskyryje.

Jeigu pirmąja astronomijos problema pavadinsime, kaip daro daugelis, kosmologinę problemą, tai nesuklysime antruoju numeriu įrašę juodųjų skylių problemą.

19. Kvazarai ir galaktikų branduoliai. Galaktikų susidarymas

Kvazarai buvo atrasti 1963 m. Taip sakydami turime omenyje, kad tada buvo išmatuotas jų spektro (konkrečiai kvazaro 3C273 spektro) raudonasis poslinkis, t. y. regimųjų spektro linijų dažnių sumažėjimas dėl *Doplerio efekto*, t. y. jų poslinkis link raudonosios spektro dalies, bylojantis, jog objektas tolsta. Taigi kvazarai atrasti 4—5 metais anksčiau už pulsarus. Tačiau pulsarų prigimtis

netruko paaiškėti, o apie kvazarus to nepasakytume. Tiesa, pradžioje dargi daug metų reikštų hipotezių apie kažkokią perdėm nepaprastą kvazarų prigimtį dabar jau atsisakyta (ar beveik atsisakyta). Tai pirmiausia pasakytina apie prielaidą, jog šis labai didelis raudonasis poslinkis susidarąs ne dėl Doplerio efekto, o dėl kažkokios kitos priežasties, todėl apskaičiuoti iš to poslinkio milžiniški — milijardų šviesmečių — atstumai iki kvazarų esą klaidingi.

Kvazarų (kvazižvaigždinių radijo šaltinių — QSR) jau žinoma apie 400; laikoma, kad tai poklasis kur kas gausesnės klasės, kurią sudaro kvazižvaigždiniai objektai (QSO) ir aktyvieji branduoliai, rasti daugelyje galaktikų. Susidaro įspūdis, kad čia susiduriame su vienu reiškiniu — palyginti nedidelio tūrio, bet gigantiškos masės branduolio susidarymu galaktikos centre — daugybės žvaigždžių ir dujų telkinyje. Branduolio matmenys yra 10^{16}—10^{17} cm eilės (priminsime, kad Žemės orbitos skersmuo — apie $3 \cdot 10^{13}$ cm). Jo masė siekia 10^{8}—10^{9} Saulės masių, taigi tik 100—1000 kartų mažesnė už visos mūsų Galaktikos masę. Tokio branduolio susidarymas galaktikos centre, jeigu ji pakankamai lėtai sukasi,— natūralus reiškinys: dujos ir žvaigždės „suteka" į gilią potencialo duobę.

Gravitacinėms jėgoms suspaudžiant didelę masę, aišku, išsiskiria daug gravitacinės energijos, pavyzdžiui, apie 10^{54} J, t. y. apie 10^{10} kartų daugiau negu yra išspinduliavusi mūsų Saulė per visą savo gyvavimą. Žinomų kvazarų šviesis siekia 10^{41} J/s — tai didžiausias gamtoje stebimas šviesis, 10 tūkstančių kartų didesnis už visos mūsų Galaktikos šviesį (10^{37} J/s eilės). Galima apskaičiuoti, jog 10^{54} J energijos užteks netgi šitokiam neregėtam šviesiui palaikyti šimtus tūkstančių metų. Be radijo ir (daugiausia) infraraudonųjų bei regimųjų bangų, kvazarai, bent kai kurie, intensyviai skleidžia Rentgeno spindulius. Štai, iš 111 kvazarų, tirtų kosminės Rentgeno laboratorijos „Einšteinas", 35 pasirodė esą ir 10^{34}—10^{40} J/s šviesio Rentgeno spindulių šaltiniai, o tiriant kvazarą 3C273, kurio šviesis Rentgeno diapazone 10^{39} J/s, aptiktas (kol kas vienintelis!) dar ir gama spinduliavimas, kurio šviesis siekia $2 \cdot 10^{39}$ J/s. Tokie milžiniški šviesiai kietųjų spindulių diapazone labai reikšmingi, apie tai pakalbėsime vėliau, 20 skirsnyje.

Kas gi tasai 10^{16}—10^{17} cm skersmens spinduliuojantis branduolys? Pačioje spinduliuojančioje srityje, atrodo, nėra kažkokių nepaprastų sąlygų. Čia daug reliatyvistinių dalelių (tarp jų ir elektronų), didelis spinduliavimo tankis, yra gana stiprus magnetinis laukas. Stebimuosius reiškinius galima paaiškinti *sinchrotroniniu spinduliavimu* ir atvirkštine Komptono sklaida (ilgesniųjų bangų fotonų sklaida, susiduriant su reliatyvistiniais elektronais), iš dalies ir

šiluminiu (t. y. stabdomuoju) karštos plazmos spinduliavimu. Dar daugiau, šie reiškiniai priklauso nuo to, kas vyksta spinduliuojančio branduolio viduje — jo šerdyje (kerne), kur yra „mašina", „varanti" kvazarą arba branduolį. Todėl apie spinduliuojantį branduolį kartais kalbama kaip apie „juodą dėžę". Bet kas gi slypi „juodoje dėžėje", kokios prigimties yra kvazarų ir galaktikų aktyviųjų branduolių šerdys?

Į šį klausimą mokslas dar neatsako, ir neaišku, kada galės atsakyti. Labiausiai tikėtini du šerdies modeliai: masyvi juodoji skylė ir magnetoidas arba spinaras — besisukanti įmagnetintos plazmos masė (superžvaigždė) be juodosios skylės centre. Svarstoma ir apie dar vieną — tankaus žvaigždžių spiečiaus — modelį, bet jis dėl keleto priežasčių yra mažiau tikėtinas už abu anksčiau minėtuosius.

Tarus, kad juodųjų skylių gali būti, t. y. kad galima remtis BRT (kaip jau ne kartą pabrėžėme, tai iš tiesų išmintingiausia nuomonė), laikyti masyvią juodąją skylę kvazaro ir aktyviosios galaktikos branduolio šerdies modeliu atrodo natūralu ir patrauklu. Iš tiesų, didžiulės masės negali išlikti pusiausvyros būsenoje, o juodosiomis skylėmis gali virsti masyvūs kūnai. Bet, kita vertus, šitaip galvojant, reikėtų tikėtis rasti masyvių juodųjų skylių mūsiškės Galaktikos ir kitų galaktikų centruose. O tai, beje, prieštarauja kai kurių stebėjimų duomenims ir teorinėms išvadoms, nors apskritai šis uždavinys dar neišspręstas. Kolapsui „iki pabaigos" — iki susidarant masyviai juodajai skylei — trukdo tai, kad būtina kažkaip „atsikratyti" judesio kiekio momento. Ši aplinkybė, tiksliau sakant, sulėtina kolapsą. Vėliau atsiranda kiti priešingi veiksniai — didžiulė masė „subyra", išsisklaido dalimis, susidaro stipriai sąveikaujančios dvinarės žvaigždės, vyksta branduoliniai procesai. Todėl, reikia manyti, gali susiklostyti ir tokios aplinkybės, kad tanki dujų masė išsisklaidytų ar bent jau labai ilgai neįvyktų kolapsas — nesusidarytų masyvi juodoji skylė. Užtenka, kad tokių skylių susidarymas „užtruktų" kelis milijardus metų, kad jos retai atsirastų galaktikose ir kvazaruose ar netgi kad jų išvis nebūtų įmanoma praktiškai aptikti.

Šitaip samprotaudamas, anaiptol nenoriu kategoriškai prieštarauti nuomonei, jog kvazarų ir galaktikų branduolių aktyvumą galima sieti su juodosiomis skylėmis. Tiktai negalima priimti šios hipotezės neįrodžius, tarsi ji būtų labiausiai tikėtina, bemaž privaloma. Būtina išaiškinti stebėjimais kvazarų šerdžių ir galaktikų aktyviųjų branduolių prigimtį. Šiokių tokių — deja, ne puikiausių — galimybių esama (pavyzdžiui, tiriant spinduliavimo intensyvumo kitimą). Verta atkreipti dėmesį ir į tai, kokias perspektyvas čia atvers didelių energijų neutrinų astronomijos raida.

Tyrinėjant galaktikas ir kvazarus, susiduriama su dar viena rimta problema: kaip gi susidaro galaktikos (kartu ir kvazarai) bei galaktikų spiečiai? Su šia problema siejasi ir kai kurie kosmologijos klausimai, ir „masės deficito" problema.

20. Kosminių spindulių, kosminio gama ir Rentgeno spinduliavimo kilmė

Tiksliau ir moderniau šį skirsnį galėtume pavadinti „Didelių energijų astrofizika". Tiesa, pastaroji nagrinėja ir didelių energijų neutrinus, o apie juos plačiau kalbėsime sekančiame skirsnyje. Tačiau visą kitą (didžiausią) didelių energijų astrofizikos dalį galime suskaidyti į kosminių spindulių astrofiziką, Rentgeno astronomiją ir gama astronomiją.

Be didelių energijų astrofizkos neįmanoma įsivaizduoti šių dienų astronomijos. Aš dirbu šioje srityje maždaug trisdešimt metų ir tiek jau esu rašęs, ypač apie kosminių spindulių kilmę, kad nebeįstengiu dar kartą smulkiai gvildenti šią temą ir džiaugiuosi galėdamas čia apsiriboti tik keliomis pastabomis.

Ypač įspūdinga buvo praeitą dešimtmetį Rentgeno astronomijos pažanga. Pirmasis Rentgeno spindulių šaltinis Galaktikoje buvo atrastas 1962 m. raketoje sumontuota aparatūra. Specialiems Rentgeno spinduliavimą tiriantiems palydovams sukurti prireikė kelerių metų — jie pradėjo skrieti praeitą dešimtmetį. Savotiška kulminacija buvo kosminės observatorijos „Einšteinas" paleidimas 1978 m. Joje įtaisytas Rentgeno teleskopas, kurio skiriamoji geba — lanko sekundės, t. y. beveik nesiskiria nuo geriausių Žemėje veikusių optinių teleskopų. Jau gauta tiek daug ir tokių patikimų rezultatų, kad galime sakyti, jog Rentgeno astronomija apskritai yra pasiekusi optinės ir radijo astronomijos lygį.

Stebėjimai įvairių diapazonų bangomis anaiptol nedubliuoja vieni kitų. „Rentgeno dangus", „optinis dangus" ir „radijo dangus" visai nepanašūs — gal tik Saulė „matoma" visomis bangomis. Taigi Rentgeno astronomijos laimėjimai — tai ne keletas atradimų. Ir vis tik verta išskirti du atradimus. Pirmasis — atrastos galingos „Rentgeno žvaigždės" — glaudžios dvinarės žvaigždės, tarp jų ir Rentgeno pulsarai. Antrasis — aptikti Rentgeno spindulių pliūpsniai, kurių šaltiniai pavadinti barsteriais. Čia, regis, pirmiausia susidurta su Rentgeno spinduliavimu arti neutroninių žvaigždžių paviršiaus arba ir paviršiuje, kai staigiai padaugėja į jas krintančios plazmos ir vyksta nukritusios medžiagos termobranduolinis „degimas".

Stebimoji gama astronomija praktiškai atsirado praeitą dešimtmetį. Jos pasiekimai dar kur kas kuklesni nei Rentgeno astrono-

mijos. Tačiau esama tvirto pagrindo tikėtis, kad per šį dešimtmetį gama astronomija pasidarys iš esmės taip pat svarbi, kaip radijo, optinė ir Rentgeno astronomija. Jau gauta svarių rezultatų įvairiose plačiausio gama spektro srityse, kur kvantų energija — nuo šimtų iki 10^8—10^9 kiloelektronvoltų ir dar daugiau [29].

Beje, dar iki atrandant Rentgeno spinduliavimo pliūpsnius buvo atrasti gama pliūpsniai. Jų prigimtis visą laiką buvo neaiški, ir tik visai neseniai, galima sakyti, pakankamai patikimai išaiškinta, kad gama pliūpsniai susidaro Galaktikoje ir yra kažkaip susiję su žvaigždėmis,— labiausiai, o gal ir vien tik, su neutroninėmis. Ypač vertas dėmesio galingas ir savotiškas gama pliūpsnis, užregistruotas 1979 m. kovo 5 d. Galbūt šio pliūpsnio šaltinis yra įsižiebusios Didžiajame Magelano debesyje supernovos likučiai (veikiausiai neutroninė žvaigždė).

Kosminių spindulių kilmės problema gvildenama nuo pat jų atradimo 1912 m. Tačiau dėl daugelio priežasčių vargu ar galima sakyti, jog kosminių spindulių astrofizika buvo iki 1951 m. Per tris dešimtmečius nuveikta daug, bet dar prieš dešimtmetį [1] straipsnyje teko pabrėžti, jog neaiškus pagrindinis klausimas — kaip atsiranda didžioji dalis prie Žemės stebimų kosminių spindulių. Štai nepavyko pakankamai patikimai įrodyti, jog teisingas būtent autoriaus ginamasis galaktinis jų kilmės modelis, kuris bendrais bruožais atrodo šitaip: Žemėje registruojamieji kosminiai spinduliai gimsta mūsų Galaktikoje, bet daugiausia ne pačiame jos diske, o tam tikroje, gaubiančioje centrinę jos dalį, primenančioje sferą, srityje — hale,— kurios būdingi matmenys 10 kiloparsekų, t. y. maždaug trečdalis Galaktikos skersmens. Dabar, esu įsitikinęs, šį modelį galima priimti nesvyruojant: atradus radiohalus ir matomas iš „šono" galaktikas NGC 4631 ir NGC 891, gavus dar kitų duomenų, neliko abejonių, jog apie mūsų galaktiką yra „kosminių spindulių halas". Kitas svarus laimėjimas — nustatyta gama astronomijos metodu, jog kosminių spindulių intensyvumas mažėja į Galaktikos pakraščius (tiesa, tą dar reikia patikslinti).

Prieš dešimtmetį rašytame [1] straipsnyje problemos, išvardytos šio straipsnio antraštėje, buvo siauresnės, lokališkesnės, konkretesnės. O dabar, kalbant apie didelių energijų astrofiziką, jau netinka paminėti vieną ar net tris problemas — šių dienų „itin svarbių ir įdomių problemų" sąraše jų turėtų būti kur kas daugiau.

21. Neutroninė astronomija

Jei kalbėsime tik apie eksperimentinius rezultatus, neutrinų fizikoje per dešimtmetį mažai kas įvyko. Daug metų mėginama detektuoti chloro—argono (trumpiau sakant, tiesiog chloro) detek-

toriumi Saulės neutrinus, bet ilgai nebuvo gauta teigiamų rezultatų. Tik paskutiniai duomenys byloja, kad jų esama.

Tiesa, ir šiandien apskaičiuotosios vertės yra 3—4 kartus didesnės už eksperimentines. Tačiau turiu prisipažinti (gal net atsiprašyti), kad man tokie nesutapimai nedarė ir nedaro įspūdžio, nes suprantu, kaip sunku tiksliai apskaičiuoti srautą Saulės neutrinų, kurių energija didesnė kaip 0,81 MeV (o būtent tokius registruoja chloro—argono detektorius). Juos daugiausia skleidžia irstantys boro-8 branduoliai. Apskaičiuotasis šių neutrinų srautas labai priklauso nuo temperatūros Saulės centre ir apskritai nuo pasirinkto Saulės modelio. Tiesa, tą faktą, kad bandymais gautasis neutrinų srautas triskart mažesnis už apskaičiuotąjį, tam tikromis sąlygomis galima paaiškinti neutrinų osciliacijomis (vienos rūšies neutrinų virtimu kitos rūšies neutrinais, sakysime kad ir pakeliui iš Saulės į Žemę), apie kurias pastaruoju metu tiek daug svarstoma. Tačiau padaryti išvadą, kad teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai skiriasi būtent dėl neutrinų osciliacijų, dar toli gražu ne laikas.

Sprendžiant Saulės neutrinų problemą, daug gali pasitarnauti tolesni matavimai chloro detektoriumi; be jų, būtini matavimai ir kitokiais detektoriais, ypač galio. Pastarasis detektuoja neutrinus, kurių energija didesnė kaip 0,23 MeV, todėl juo galima registruoti daugumą Saulės skleidžiamų neutrinų, kurie turi iki 0,42 MeV energiją ir dėl to praeina „nepastebėti" pro chloro detektorių.

Neutrininės astronomijos gimimas — labai svarbus įvykis, nes tik iš užregistruojamų neutrinų įmanoma gauti informacijos apie žvaigždžių centrines dalis. Tiesa, neverta tikėtis, kad per apžvelgiamą laiką pavyks užregistruoti neutrinus iš paprastų žvaigždžių. Tačiau įsižiebiant supernovoms ir susidarant neutroninėms žvaigždėms (gal ir ne visada apie tokį procesą praneša pastebimas žybsnis) gali atsirasti galingi neutrinų srautai. O juos jau įmanoma stebėti. Veikia keli tam tinkami požeminiai neutrinų teleskopai. Ypač būtų svarbu užregistruoti kosmologinės kilmės neutrinus — tokius, kurie išlėkė ankstyvose Visatos evoliucijos stadijose. Kol kas, deja, nežinoma realių būdų šiam uždaviniui išspręsti.

Pagaliau, vis daugiau dėmesio pastaraisiais metais traukia didelių energijų neutrinų astronomija. Neutrinus, turinčius šimtų megaelektronvoltų ir netgi ne vieno gigaelektronvolto energiją, išspinduliuoja vien kosminių spindulių protonai ir branduoliai. Tuo šie neutrinai primena gama spindulius, kurie išspinduliuojami skylant pi-nulis mezonams. Jau sukurta projektų, kuriuos įgyvendinus, reikia tikėtis, bus galima užregistruoti didelių energijų neutrinus, atskriejusius iš kvazarų ir galaktikų aktyviųjų branduolių. Gal būtent šiuo būdu pavyks išaiškinti, ar kvazaro šerdis yra masyvi juodoji skylė arba magnetoidas.

Neutronų astronomijai susikurti neužteko dešimtmečio. Tik vargu ar reikia tuo stebėtis — jai keliamos eksperimentinės užduotys tokios sudėtingos! Dar po dešimtmečio, tikėkimės, jau bus kitaip. Tačiau, aš manau, kad neutrinų astronomija tikrai suklestės ne anksčiau kaip šio šimtmečio pabaigoje.

Baigiamosios pastabos

Autorius, o su juo, tikiuosi, ir skaitytojai, apžvelgė mintimis dešimtmetį, per kurį įtemptai dirbo ir fizikai, ir astronomai. Dešimtmetis — tai daug laiko žmogui. Jaunuoliui — todėl, kad prieš dešimt metų jis gal dar nebuvo suaugęs. Pagyvenusiam žmogui dešimtmetis moksle — tai taip pat daug laiko, bet visai dėl kitko: vis mažiau jis gali tikėtis, kad dar ilgai prisidės prie mokslo pažangos ar bent ją seks. Bet jeigu mes laiką, jo tėkmę suvoksime ne subjektyviai, tai dešimtmetis moksle neatrodys toks jau ilgas. . . Prisiminkime, kad specialiajai reliatyvumo teorijai jau maždaug 75 metai, bendrajai reliatyvumo teorijai — 65 metai, kvantinei mechanikai — 55 metai, bet ir šiandien šios fundamentaliosios teorijos dar gilinamos ar bent jau nagrinėjami jų taikymai konkrečioms fizikos problemoms spręsti. Superlaidumas buvo atrastas 1911 metais, o kosminiai spinduliai 1912 metais, bet ir šiandien abiem šioms problemoms — superlaidumui ir kosminiams spinduliams — skiriama daug dėmesio, jas gvildena kur kas daugiau žmonių, negu pirmuosius du tris dešimtmečius po atradimo. Vadinasi, šių dienų fizikoje laiko mastelis yra ilgesnis nei vieno žmogaus aktyvios veiklos trukmė, jau nekalbant apie dešimtmetį. Be to, kai kurie šių dienų eksperimentiniai įrenginiai (greitintuvai, kosminės observatorijos, antžeminiai optiniai ir radijo teleskopai) yra tokie sudėtingi, kad nuo jų projektavimo pradžios iki paleidimo vėlgi praeina kokie dešimt penkiolika metų.

Turint visa tai omenyje, atrodo visai natūralu, kad per dešimtmetį, skiriantį šį straipsnį nuo pirmojo, dauguma problemų sąraše nepasikeitė, nors ir daug buvo išaiškinta naujų dalykų. Tiesa, žymiai pakito mikrofizika, bet jai tie metai buvo, regis, neeiliniai (beje, daugelis naujų idėjų buvo pareikšta jau anksčiau, pavyzdžiui, kvarkų hipotezė — 1963—1964 metais).

Taigi fizikos ir astrofizikos raidai — ne itin ilgas laikas, bet per jį jau gali sužinoti nemažai naujienų.

Todėl, man regis, rašyti šį straipsnį, kaip tam tikrą [1] straipsnio tęsinį, tiko būtent dabar — po dešimties metų. Tik ar apskritai vertėjo tuos straipsnius rašyti? Tesprendžia kiti. Aš tik pasakysiu, kad rašyti abu straipsnius buvo sunku, bet įdomu. Fizika ir astronomija taip išsišakojo, kad tikrai nebuvo lengva pasekti netgi dvi

dešimtis krypčių, kurias čia išskyriau. Kita vertus, vienu metu galima detaliai, taip sakant, profesionaliai gvildenti tik vieną dvi problemas. O dirbant prie vieno ir kito straipsnio, teko peržiūrėti bent probėgšmais daug ir plataus spektro medžiagos. Taip sužinai nemažai naujų dalykų, medžiai nebeužstoja miško, išryškėja ateities perspektyva, dar aiškiau suvoki, kokia plati ir kartu giliai vieninga fizika, koks turtingas jos turinys. Jei daugiau ar mažiau tą pajus dalis skaitytojų, tikslas bus pasiektas.

Literatūra

1. *Гинзбург В.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными.— УФН, 1971, т. 103, вып. 1. Адаптированный вариант.— Наука и жизнь, 1971, № 2.

2. *Гинзбург В.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (десять лет спустя).— УФН, 1981, т. 134, вып. 3.

3. *Велихов Е.* Физика — наука наступающая.— Наука и жизнь, 1981, № 11.

4. *Кадомцев Б.* Пути к термоядерной энергетике.— Наука и жизнь, 1975, № 1.

5. *Сворень Р.* Лазерный луч надежды.— Наука и жизнь, 1979, № 7.

6. *Щеголев И.* В поисках высокотемпературной сверхпроводимости.— Наука и жизнь, 1975, № 2.

7. *День физики.*— Наука и жизнь, 1968, № 8.

8. *Птускин В.* Рекордсмены магнитного мира.— Наука и жизнь, 1978, № 8.

9. *Сонин А.* Кентавры в рабочей упряжке.— Наука и жизнь, 1978, № 2.

10. *Сворень Р.* Планируется прорыв.— Наука и жизнь, 1975, № 1.

11. *Побожий Ю.* Сто седьмой.— Наука и жизнь, 1977, № 4.

12. *Логунов А., Ярба В.* В глубине строения материи.— Наука и жизнь, 1981, № 3.

13. *Шифман М.* Продолжение следует.— Наука и жизнь, 1981, № 6.

14. *Сворень Р.* Конструируется микромир.— Наука и жизнь, 1981, № 9.

15. *Салам А.* Последний замысел Эйнштейна: объединение фундаментальных взаимодействий и свойства пространства—времени.— Природа, 1981, № 1.

16. *Сворень Р.* Призрак на весах.— Наука и жизнь, 1980, № 8.

17. *Киржниц Д.* Фундаментальная длина.— Наука и жизнь, 1977, № 7.

18. *Смородинский Я.* Что знают и что пытаются узнать об элементарных частицах.— Наука и жизнь, 1968, №№ 4, 5, 6.

19. *Батыгин В.* Законы микромира.— М.: Просвещение, 1981.

20. *Мигдал А.* «Огонь, мерцающий в сосуде».— Наука и жизнь, 1978, № 8.

21. *Брагинский В.* Механический эксперимент в век электроники.— Наука и жизнь, 1975, № 5.

22. *Брагинский В.* В поисках гравитационных волн.— Наука и жизнь, 1976, № 10.

23. *Сворень Р.* Как измерить волосок в шевелюре электрона.— Наука и жизнь, 1980, № 8.

24. *Гинзбург В.* Как устроена Вселенная и как она развивается во времени.— Наука и жизнь, 1968, №№ 1, 2, 3.

25. *Зельдович Я.* Нейтронные и колапсирующие звезды.— Наука и жизнь, 1981, № 7.

26. *Новиков И.* Гравитация, нейтрино и Вселенная.— Наука и жизнь, 1980, № 10.
27. *Новиков И., Лукаш В.* Эхо большого взрыва.— Наука и жизнь, 1981, № 7.
28. *Муханов В.* Гравитационная линза во Вселенной.— Наука и жизнь, 1981, № 5.
29. *Кириллов-Угрюмов В., Гальпер А.* Штрихи невидимой Вселенной.— Наука и жизнь, 1981, № 8.

RETESNIŲJŲ FIZIKOS TERMINŲ PAAIŠKINIMAI

Barionai — elementariosios dalelės, turinčios pusinį sukinį ir rimties masę, ne mažesnę kaip protono masė (neutronas, protonas, hiperonai ir kt.). Barionai dalyvauja stipriosiose sąveikose.

Bozonai — elementariosios ar sudėtinės dalelės, turinčios sukinį, lygų sveikajam skaičiui. **Tarpiniai bozonai** — sunkios dalelės, perduodančios silpnąsias sąveikas.

Diamagnetizmas — medžiagos įmagnetėjimas magnetiniame lauke priešingai išorinio lauko krypčiai.

Superdiamagnetizmas — išorinio magnetinio lauko išnykimas medžiagos viduje dėl joje atsirandančio priešingo magnetinio lauko veikimo.

Doplerio efektas — stebėtojo registruojamų bangų (pvz., šviesos) dažnio pakitimas, jei bangų šaltinis ir stebėtojas juda vienas atžvilgiu kito.

Elektronvoltas (eV) — mikrofizikoje naudojamas nesisteminis energijos vienetas, lygus $1,602 \cdot 10^{-19}$ J. Kartotiniai vienetai: megaelektronvoltas ($1 \text{ MeV} = 10^6$ eV) ir gigaelektronvoltas ($1 \text{ GeV} = 10^9$ eV).

Feromagnetizmas — savaiminis kai kurių medžiagų įmagnetėjimas dėl tvarkingos atominių magnetėlių orientacijos.

Gliuonai — hipotetinės dalelės, perduodančios stipriąsias sąveikas tarp kvarkų.

Gravitacinės bangos — bangos, kurias pagal bendrąją reliatyvumo teoriją turėtų spinduliuoti su pagreičiu judantis kūnas.

Inversinis sluoksnis — sritis prie puslaidininkio paviršiaus, kurioje šalutinių krūvininkų daugiau negu pagrindinių.

Juodoji skylė — hipotetinis labai keistomis savybėmis pasižymintis kosminis objektas. Jo traukos laukas toks stiprus, jog pagauna tarsi spąstai į jo aplinką pakliuvusias daleles ir net šviesą. Juodosiom skylėmis turėtų virsti masyvios žvaigždės paskutiniame savo evoliucijos etape.

Kalibravimo teorijos — bendros teorijos, aprašančios pagrindines gamtos sąveikas laukais, kurių kvantai yra bozonai.

Kinetiniai reiškiniai — reiškiniai, atsirandantys dėl sistemos nukrypimo nuo termodinaminės pusiausvyros.

Kolapsas (gravitacinis) — masyvaus kosminio kūno staigus susitraukimas, veikiant traukos jėgoms, į juodąją skylę.

Kondensuotoji aplinka — medžiaga, esanti kietojo kūno ar skysčio būsenoje.

Kosmogonija — astronomijos šaka, tirianti kosminių kūnų bei jų sistemų kilmę ir evoliuciją.

Krūvinė sąsaja — reakcijoje dalyvaujančių elementariųjų dalelių pakeitimo jų antidalelėmis matematinė operacija.

Kvantinė elektrodinamika — elektromagnetinės sąveikos teorija, atsižvelgianti į kvantinius ir reliatyvistinius efektus.

Kvantiniai kristalai — ^3He ir ^4He kristalai, pasižymintys neįprastomis savybėmis, kurias paaiškina tik kvantinė teorija.

Leptonai — elementariosios dalelės, dalyvaujančios silpnosiose sąveikose, bet neveikiamos stipriųjų sąveikų (elektronas, miuonas, neutrinai ir kt.).

Magnonas — kvazidalelė, kietuose kūnuose sklindančių bangų, keičiančių jų magnetinę tvarką, kvantas.

Mezonai — nestabilios elementariosios dalelės, turinčios sveikąjį sukinį ir dalyvaujančios stipriosiose sąveikose.

Neutraliosios srovės — silpnųjų sąveikų apspręstos elementariųjų dalelių reakcijos, kuriose nesikeičia dalelių elektros krūviai.

Poliaritonas — kvazidalelė puslaidininkiuose bei dielektrikuose, aprašanti jų sąveiką su elektromagnetinėmis bangomis.

Polimerai — stambiamolekuliai cheminiai junginiai, susidedantys iš pasikartojančių atomų grupių.

Relaksacija — sistemos grįžimas į pusiausvyros padėtį, o sistemą charakterizuojančio dydžio — prie vertės, kurią jis įgyja pusiausvyros būsenoje.

Reliatyvistinis (procesas, reiškinys) — kuriam paaiškinti svarbūs specialiosios reliatyvumo teorijos efektai, atsirandantys dėl judėjimo greičiu, artimu šviesos greičiui.

Reliatyvistinė teorija — atsižvelgianti į specialiosios reliatyvumo teorijos efektus.

Silpnosios sąveikos — vienos iš pagrindinių sąveikų gamtoje, pasireiškiančios tik mikroatstumuose tarp elementariųjų dalelių. Jos žymiai silpnesnės negu stipriosios sąveikos, todėl svarbios leptonams, kurių neveikia stipriosios sąveikos.

Sinchrotronas — elektronų greitintuvas, kuriame jie juda spirale, greitinami kintančio magnetinio lauko.

Sinchrotroninis spinduliavimas — elektromagnetinės bangos, kurias skleidžia elementariosios dalelės, judančios magnetiniame lauke greičiu, artimu šviesos greičiui.

Skystieji kristalai — medžiagos, pasižyminčios ir skysčio, ir kristalo savybėmis — jos takios kaip skysčiai, bet jų molekulės išsidėstę tam tikra tvarka, panašiai kaip kristale.

Stipriosios sąveikos — vienos iš pagrindinių sąveikų gamtoje, pasireiškiančios tik labai mažuose atstumuose tarp elementariųjų dalelių. Jos žymiai stipresnės už kitas pagrindines sąveikas.

Sukinys — mikrodalelės kvantinė savybė, neturinti analogo klasikinėje fizikoje — jos nuosavas judesio kiekio momentas.

Termodinamika — mokslas, nagrinėjantis sistemų šilumines savybes, neatsižvelgdamas į sistemų mikroskopinę sandarą.

Termodinaminė pusiausvyra — sistemos, kuriai galioja termodinamikos dėsniai, stabili būsena, kai sistemos parametrai nepriklauso nuo laiko.

Toroidinis įrenginys — toroido (žiedo) formos įrenginys.

J. POŽELA

PLAZMA IR KARŠTIEJI ELEKTRONAI PUSLAIDININKIUOSE

PLAZMA IR JOS TYRIMAI

Plazma vadinamos jonizuotos dujos. Tai labiausiai paplitusi gamtoje medžiagos būsena. Beveik visos žvaigždės ir Saulė sudarytos iš plazmos, plazma susidaro jonosferoje, žaibo išlydžio kanaluose. Dirbtiniu būdu ji sukuriama, pavyzdžiui, įvairiuose dujiniuose išlydžiuose, liepsnoje, reaktyvinių variklių vamzdžiuose, „Tokamako" įrenginiuose, kuriuose tiriamos valdomos termobranduolinės reakcijos.

Būdingiausia plazmos savybė yra jos dalelių kolektyvinė reakcija į elektrinius ir magnetinius poveikius. Amerikiečių fizikai L. Tonksas ir E. Langmiūras dujiniame išlydyje stebėjo elektronų debesėlio kaip visumos „anomalius" svyravimus jonų debesėlio atžvilgiu. Šis reiškinys jiems priminė žele, kurią fiziologai vadina plazma, svyravimus. Jie pasiūlė tokią medžiagos būseną, kai šitaip „anomaliai" kolektyviai elgiasi elektringosios dalelės, vadinti plazma. Taigi plazmos terminas 1928 m. atėjo iš fiziologijos į fiziką. Per pastaruosius penkis dešimtmečius plazminę būseną tyrinėjo daugelis fizikų kolektyvų visame pasaulyje, ir buvo įsitikinta, kad būtent kolektyvinė elektringųjų dalelių sąveika ir su ja susijusios bangos lemia visą plazmos elgseną. Plazmos fizika — tai mokslas apie kolektyvinę elektringųjų dalelių reakciją į išorinius poveikius.

Šiandien galima išskirti tris svarbiausias plazmos tyrimų kryptis.

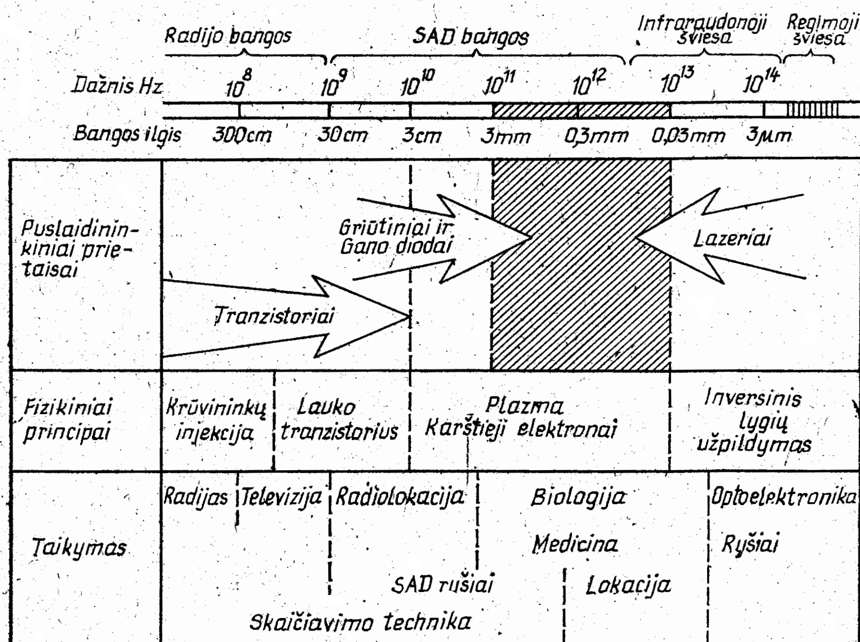
Pirmąją tiktų pavadinti astrofizikine — juk plazma yra daugumos Visatos kūnų normali būsena. Suvokus plazminius reiškinius, vykstančius kosmose, Žemės gelmėse, jos atmosferoje, tapo įmanoma paaiškinti daugelį paslaptingų gamtos reiškinių, geriau suprasti Visatos evoliuciją.

Antroji tyrimų kryptis susijusi su dirbtinės plazmos sukūrimu, tyrimu ir praktiniu taikymu. Kadangi plazma — tai dujos, susidedančios iš elektringųjų dalelių, tai elektriniai ir magnetiniai laukai gali ją deformuoti, pastumti, kaitinti ir kt. Šios plazmos savybės plačiai taikomos terminio medžiagų apdorojimo įrenginiuose. Plazmos savybė susislėgti, leidžiant ja elektros srovę, buvo panaudota kuriant įrenginius, kuriuose plazma įkaitinama iki dešimčių ir net šimtų milijonų laipsnių, kad vyktų termobranduolinė sintezės re-

akcija. Šių tyrimų pagrindu projektuojama artimiausios ateities termobranduolinė energetika. Be to, tyrinėjant dirbtinai sudarytą plazmą, paaiškėjo, kad, leidžiant elektros srovę, plazma tampa nestabili: susisuka spirale, sutankėja ir praretėja, pradeda banguoti. Įvairūs plazmos nestabilumai yra viena svarbiausių kliūčių, sprendžiant valdomos termobranduolinės sintezės problemas. Akademikas L. Arcimovičius yra vaizdžiai išsireiškęs, kad dauguma plazmos banginių melodijų skamba kaip gedulo maršas valdomos termobranduolinės reakcijos kūrimo kelyje. Plazmos nestabilumų tyrimas — viena iš pagrindinių šiuolaikinės fizikos problemų.

Trečioji tyrimų kryptis (apie ją dar pakalbėsime išsamiau) — tai svyravimų ir banginių procesų tyrimai plazmoje, susidariusioje kietuose ir skystuose kūnuose, tarp jų ir puslaidininkiuose.

Terminas „plazma puslaidininkiuose" iš pradžių gali sugluminti. Tačiau įdėmiau panagrinėjus paaiškėja, kad puslaidininkiuose laisvųjų elektronų ir skylių „dujos" kartu su įelektrintaisiais priemaišiniais atomais sudaro neutralią sistemą, kuri pasižymi pagrindine plazmos savybe — kolektyviniu atsaku į išorinius elektromagnetinius poveikius. Žinoma, plazma puslaidininkiuose savotiška, nes ji pasklidusi tarp kristalo gardelės atomų.



1 pav.

Praktinio taikymo požiūriu plazminiai reiškiniai puslaidininkiuose fizikus domina daugiausia dėl to, kad, juos ištyrus, tikimasi įsisavinti naują elektromagnetinių bangų sritį, tą, kuri yra tarp šviesos ir radijo bangų (žr. 1 pav.). Tai — vadinamosios superaukštojo dažnio (SAD) bangos, kurių ilgis yra nuo dešimčių centimetrų iki milimetro dalių, o dažnis — nuo gigaherco dalių iki tūkstančių gigahercų (1 GHz = 10^9 Hz). Puslaidininkiniai tranzistoriai ir lazeriai nedirba SAD bangų diapazone, o jei būtų galima šį diapazoną panaudoti, būtų išspręsta daug svarbių technikos uždavinių. Pavyzdžiui, taptų įmanoma padidinti elektroninių skaičiavimo mašinų veikimo spartą, smarkiai išplėsti radijo ryšio pralaidumą, sukurti tikslesnius ir mažesnius radiolokatorius. Priminsime, kad Žemės atmosfera praleidžia 70—400 GHz diapazono radijo bangas.

Ne tik technikos problemas galima išspręsti įsisavinus šį dažnių diapazoną. Milimetrinės ir submilimetrinės bangos domina mokslininkus dar ir todėl, kad tokio pat dažnio yra didelių molekulių, lemiančių organizmų gyvybinius procesus, virpesiai.

Galbūt sukūrus puslaidininkinius generatorius, stiprintuvus ir indikatorius, dirbančius šiuose diapazonuose, atsivertų iš principo nauji keliai biologijoje ir medicinoje aktyviai ir kryptingai veikti elektromagnetinėmis bangomis gyvąją materiją, gydyti įvairias ligas.

SAD virpesiams generuoti ir stiprinti šiuo metu naudojami vakuuminiai elektroniniai prietaisai. Deja, kuo aukštesnis dažnis (trumpesnis bangos ilgis), tuo jie sudėtingesni, tuo mažesnis jų naudingumo koeficientas. O submilimetriniam diapazonui praktiškai nėra vakuuminių prietaisų, kuriuos būtų įmanoma plačiau taikyti. Be to, vakuuminiai elektroniniai prietaisai pasižymi daugybe trūkumų, todėl pastaraisiais dešimtmečiais jie intensyviai keičiami puslaidininkiniais. Tikri revoliuciniai pertvarkymai vyko būtent tose technikos srityse, kur radijo lempas pakeitė puslaidininkiniai generatoriai ir stiprintuvai. Be jų neįmanoma įsivaizduoti šiuolaikinės radiotechnikos, televizijos, ryšių, susikūrė naujos mokslo ir technikos kryptys — mikroelektronika, greitaeigė skaičiavimo technika.

SAD bangų generavimo ir stiprinimo būdų, pasitelkus puslaidininkiuose vykstančius reiškinius, ieškoma jau du dešimtmečiai, tos paieškos akivaizdžiai rodo, kad čia fizikai ir inžinieriai susidūrė su kietu riešutu. Realių laimėjimų pasiekta, taikant šiems tikslams karštuosius elektronus ir plazminius reiškinius puslaidininkiuose; galima tikėtis, jog būtent šių reiškinių tyrimai padės išspręsti viso SAD diapazono įsisavinimo uždavinį. Taigi plačiau pakalbėsime apie plazmos puslaidininkiuose ypatumus.

PLAZMA PUSLAIDININKIUOSE

Kristalo atomų jonizacijos energija, reikalinga judriems krūvininkams atsirasti, dešimtis ir šimtus kartų mažesnė už dujų atomų jonizacijos energiją. Todėl plazma puslaidininkiuose gali susidaryti netgi temperatūroje, artimoje absoliutiniam nuliui, o dujų plazmai reikia šimtų ir tūkstančių Celsijaus laipsnių. Plazma puslaidininkiuose skiriasi nuo dujų plazmos žymiai didesne elektringųjų dalelių koncentracija. Visuose puslaidininkiuose kambario temperatūroje yra stabili plazma, kurios krūvininkų koncentracija 10^{12}—10^{22} cm^{-3}, ir ją galima keisti plačiose ribose, puslaidininkį apšviečiant, šildant ar kitaip veikiant. Dar daugiau, puslaidininkiuose galima keisti nepriklausomai teigiamo ir neigiamo krūvio judriųjų dalelių skaičių.

Kadangi kristalo atomų jonizacijos energija maža, galima ir elektriniu lauku staiga padidinti laisvųjų elektronų ir skylių skaičių. Įgavęs elektriniame lauke vos 1—2 eV energiją, laisvasis elektronas jau sugeba išmušti iš atomo išorinio sluoksnio naują elektroną. Tuomet jau du elektronai, pagreitinti lauko, išmuša dar du naujus elektronus. Susidaro tikra elektronų griūtis, šimtosios centimetro kelyje elektronų skaičius padidėja šimtus kartų!

Puslaidininkiuose, veikiant elektriniam laukui, didėja elektrono greitis ir jo energija, taigi kyla temperatūra. Stipriuose elektriniuose laukuose vidutinė elektronų energija (jų temperatūra) gali žymiai viršyti pusiausvirąją elektronų energiją, susijusią su viso puslaidininkinio kristalo temperatūra. Kitaip tariant, elektronai ne tik pagreitėja, bet ir įkaista. Tokius elektronus įprasta vadinti karštaisiais. Elektronai įkaista per 10^{-11}—10^{-12} s. O kai toks mažas įkaitimo inertiškumas, tai iš karto kyla mintis, jog karštųjų elektronų efektus galima pritaikyti SAD diapazonui įsisavinti.

Ypač svarbi plazmos puslaidininkiuose savybė — kad elektrono arba skylės masė priklauso nuo jo energijos ir judėjimo krypties. Elektrono masė puslaidininkyje paprastai būna daug mažesnė už laisvo elektrono masę, todėl ji vadinama efektine. Efektinė masė didėja, didėjant elektrono energijai, beje, kartais labai smarkiai. Pavyzdžiui, galio arsenide elektronams įkaitus vos iki kelių dešimtųjų elektronvolto, jų efektinė masė padidėja dešimtis kartų.

Pažymėsime dar vieną gana svarbią savotišką plazmos puslaidininkiuose savybę. Žinoma, kad didelio tankio plazma, kaip ir bet kuris kitas didelio elektrinio laidumo kūnas (pvz., metalas), nepraleidžia elektromagnetinių bangų. Pastarosios atsispindi nuo kūno paviršiaus, o įsiskverbusioji dalis sugeriama mažame gylyje — vadinamajame paviršiniame („skin") sluoksnyje. Šis sluoksnis tuo plonesnis, kuo didesnis bangų dažnis ir plazmos laidumas. Plazmoje

puslaidininkiuose ir metaluose SAD bangoms šis sluoksnis yra 10^{-1}—10^{-4} cm storio. Atrodytų, kad plazma puslaidininkiuose yra nelaidi SAD bangoms, taigi nėra ko nė kalbėti apie jos panaudojimą tokioms bangoms generuoti. Tačiau 1960 m. teoriškai ir eksperimentiškai buvo parodyta, kad magnetiniame lauke laidi plazma praleidžia elektromagnetines bangas. Pastarosios, įeidamos į plazmą, pasidaro apskritai poliarizuotos, todėl jos buvo pavadintos helikoninėmis. Helikoninių ir kitokio tipo bangų susidarymas laidžioje aplinkoje yra perdėm plazminis efektas — plazmos atsakas į elektromagnetinį žadinimą. Pažymėtina, kad helikoninių bangų egzistavimas išplaukia iš klasikinių judėjimo ir Maksvelo lygčių, taigi jos galėjo būti atrastos dar praeitame šimtmetyje.

Helikoninės ir kitos, giliai įsiskverbiančios į puslaidininkį, elektromagnetinės bangos plazmoje jau panaudojamos puslaidininkio parametrams matuoti bekontakčiu būdu ir netgi jo kristalografinėms kryptims nustatyti. Jau galima kalbėti apie atsirandančią naują kryptį plazmos puslaidininkiuose fizikoje — helikoninę spektroskopiją.

Minėtosios ir kitos savitos plazmos puslaidininkiuose savybės atveria gana aiškias perspektyvas naujiems SAD generavimo ir stiprinimo metodams kurti.

SAD BANGŲ GENERAVIMAS

Dar 1959 m. tarybinis fizikas A. Tageris su bendradarbiais aptiko, kad, susidarant silicyje elektronų griūčiai, generuojami centimetrinio diapazono SAD virpesiai.

Sukūrus griūtinius diodus, buvo atrastas dar vienas SAD bangų generavimo puslaidininkiuose būdas. 1963 m. amerikiečių fizikas Dž. Ganas pastebėjo, kad, prijungus prie galio arsenido kristalo nuolatinę įtampą, jis generuoja SAD bangas. Šis Gano efektas susidaro todėl, kad plazma puslaidininkiuose turi dar kitą ypatumą: elektrono efektinė masė, elektriniam laukui padidėjus iki tam tikro stiprumo, padidėja šuoliu. (Galio arsenidui šis lauko stiprumas yra virš 3 kV/cm.) Staigiai „pasunkėjus" elektronui, sumažėja jo greitis ir judrumas, todėl susilpnėja elektros srovė elektrinėje grandinėje. Dėl staigaus srovės susilpnėjimo sustiprėjus elektriniam laukui, elektrinėje grandinėje sukuriama nestabili būsena ir srovės virpesiai.

Gano ir griūtiniai diodai sėkmingai veikia centimetrinių bangų srityje, taigi puslaidininkinių prietaisų dažnių riba paslenka daugiau kaip per dekadą į SAD diapazoną (žr. 1 pav.). Jie panaudojami kryptinio ryšio aparatūroje, veikiančioje 10—30 km atstumu, kilnojamuose radiolokatoriuose, kontrolės ir matavimo aparatūro-

je. Mūsų šalyje sukurtos ir pramonės išleidžiamos retransliacinės radiorelinio ryšio stotys, kilnojamosios kryptinio radijo ryšio stotys tokių gabaritų ir svorio, kaip įprastiniai tranzistoriniai imtuvai. Matyt, netolimoje ateityje radiorelinis ryšys pakeis vietinį telefono ryšį.

Griūtiniai diodai prasiskverbė ir į milimetrinio diapazono ilgesniųjų bangų sritį. Čia jau galima prisiliesti prie gyvos materijos. Nustatyta, kad milimetrinių bangų elekromagnetinis laukas užmuša daugelį ligas sukeliančių bakterijų, tarp jų ir stafilokokus. Griūtinių diodų pagrindu sukonstruota aparatūra žaizdoms ir nudegimams švitinti, kad neprasidėtų uždegimas, sparčiau gytų.

Deja, dar trumpesnių bangų milimetriniam ir submilimetriniam diapazonui griūtiniai ir Gano diodai jau netinka;— jų naudingumo koeficientas ir spinduliuojama galia staigiai sumažėja. Šiuos bangų ilgius atitinka 10^{11}—10^{12} Hz dažniai. Vadinasi, fizikiniai procesai, kurių pagrindu veikia prietaisai, turi įvykti per 10^{-11}—10^{-12} s, nestabdomi inertiškumo. Deja, kaip jau minėjome, elektronams įkaisti prireikia 10^{-11}—10^{-12} s, vadinasi, šio proceso inertiškumas turės įtakos submilimetrinių bangų diapazono prietaisams. Tai viena priežasčių, mažinančių griūtinių ir Gano diodų efektyvumą šiame diapazone. Tačiau paskutiniaisiais metais pareikšta nemažai idėjų, kurias pritaikius, regis, elektronų kaitimas plazmoje galėtų būti panaudotas submilimetrinių bangų diapazonui įsisavinti.

Viena tokių idėjų — srovės nestabilumai plazmoje, kai ją veikia vienas kitam statmeni elektrinis ir magnetinis laukas. Tuomet plazmoje susidaro tam tikros rūšies inversinė pagal energiją elektronų būsena, panaši į tą, kuri sudaroma lazerio aktyvioje medžiagoje ją apšviečiant*. Tomis sąlygomis gaunamas plazmos bangų stiprinimas, analogiškai šviesai lazeriuose. 1982 m. LTSR MA Puslaidininkių fizikos instituto bendradarbiai kartu su Leningrado mokslininkais iš germanio kristalo gavo šimto mikronų bangos ilgio elektromagnetinį spinduliavimą. Tai nuteikia optimistiškai — artimiausiais metais gali būti sukurti submilimetrinių bangų generatoriai ir stiprintuvai.

Didelės koncentracijos nepusiausviri plazma puslaidininkiuose, susidariusi, pavyzdžiui, dėl griūtinės jonizacijos, yra nestabili ir magnetiniame lauke gali virpėti superaukštu dažniu. Šiuos virpesius sinchronizavus, gaunamos tokios plazmos generuojamos submilimetrinio diapazono elektromagnetinės bangos.

Vienas iš naujausiai atrastų reiškinių puslaidininkiuose — balistinis elektronų permetimas. Jis vyksta labai mažų matmenų (mažesnių kaip mikrono) prietaisuose, pastaruoju metu intensyviai kuria-

* Žr. sekantį straipsnį.

muose visame pasaulyje. Tokiuose superminiatiūriniuose prietaisuose karštieji elektronai pralekia nuo vieno elektrodo iki kito taip greitai, kad nespėja susidurti nė su vienu kristalinės gardelės atomu. Aišku, kad griūtinė jonizacija įvykti negali. Pasirodo, balistinius elektronus galima pagreitinti iki didesnių greičių, negu sąveikaujančius su gardele. Tai leis sukurti dar aukštesnio dažnio prietaisus. Jau dabar gaminami specialūs balistinių elektronų superminiatiūriniai SAD tranzistoriai.

Prietaisų matmenis sumažinus iki šimtųjų mikrono dalių, o tai mažiau už elektrono matmenis, elektronų judėjimas pasidaro kvantinio pobūdžio: jie elgiasi jau ne kaip dalelės, o kaip bangos. Tokių dydžių yra ir gyvosios gamtos „elektroniniai" prietaisai, veikiantieji SAD 10^{10}—10^{13} Hz diapazone. Galbūt gyvoji gamta mums ir padės teisingai išspręsti SAD bangų generavimo problemą. Tada įvyks neįtikėtina: mes pradėsime kurti gyvosios materijos elektroninius prietaisus, įsibrausime į šventąją gyvybės paslaptį, smegenų „skaičiavimo mašiną". SAD diapazono puslaidininkinių prietaisų generuojamos elektromagnetinės bangos galės prireikus reguliuoti krūvio pernešimą biologinėje plazmoje (kuri, beje, neturi nieko bendra su fizikine plazma), jonų pernešimą per ląstelių membranas. O mes galėsime tiesiogiai bendrauti su gyvąja materija, su smegenimis.

Taigi matome, kad naujos teorinės idėjos ir kai kurie eksperimentiniai rezultatai skatina optimistiškai tikėtis, kad milimetrinio ir submilimetrinio bangų diapazono įvaldymas pasitelkus puslaidininkinius prietaisus — artimos ateities reikalas. Šio diapazono radiotechninės priemonės bus iš esmės kitokios, bus išspręsta daug svarbių techninių uždavinių, žmonija gaus galingą įrankį mus supančiai aplinkai tyrinėti ir paveikti. Su šiuo diapazonu bus baigtas viso elektromagnetinių bangų spektro įsisavinimas — nuo regimosios šviesos iki garso ir dar žemesnio dažnio bangų.

NETOLIMOJE ATEITYJE...

Atradus naujus fizikinius reiškinius, sukūrus naujus metodus, kaip liudija mokslo istorija, prasideda revoliuciniai pertvarkymai moksle ir technikoje. Pafantazuokime apie SAD generatorių ir stiprintuvų panaudojimą ateityje.

Kiekvienas žmogus nešiojasi kišenėje „užrašų knygutę" — SAD imtuvą-siųstuvą ir per rajoninę radiorelinę liniją (o toliau — per optoelektroninius ryšio kanalus) gali kalbėtis su bet kuriuo Žemės rutulio gyventoju (arba mašina). Dar daugiau, kalbėtis, kai jam patogu, nes SAD ir optoelektroninio ryšio linijų pralaidumas — milijonai kanalų viename spindulyje...

Elektroninės skaičiavimo mašinos su SAD prietaisais atlieka milijardus operacijų per sekundę...

Puslaidininkiniai elementai verčia Saulės energiją SAD spinduliavimu, kuris perduodamas iš orbitinių Saulės elektrinių reikiama kryptimi į Žemę. O pačios elektrinės sujungtos į pasaulinę (arba nacionalinę) sistemą, pritaikius tuos naujus SAD generatorius ir priėmimo antenas. Energetikos problema sprendžiama neteršiant ir neniokojant mus supančios aplinkos...

Išmokus reguliuoti puslaidininkinių SAD generatorių spinduliavimo fazę, galima sukurti elektriškai reguliuojamas radiolokatorių antenas, skleidžiančias siaurą spindulį. Miniatiūriniai radiolokatoriai plačiai taikomi ne tik oro ir vandens transporto, bet ir automašinų eismui valdyti...

Į biologiją, mediciną, gyvulininkystę, augalininkystę veržiasi nauji poveikio gyvajai materijai fizikiniai metodai. Vietoj dabar medicinoje naudojamų kietųjų branduolio spindulių į praktiką įeina „minkštieji" SAD spinduliai, neardantys ląstelių, bet aktyviai ir selektyviai veikiantys pasirinktąsias gyvosios materijos molekules, reguliuojančias organizmo veiklą. Cheminius poveikio gyviems organizmams ir gamtai metodus išstumia fizikiniai. Vaistus ir nuodinguosius chemikalus keičia SAD švitinimas. Galbūt pavyks naikinti piktybines ląsteles bet kurioje organizmo dalyje, švitinant tokio dažnio elektromagnetiniais spinduliais, kad rezonuotų su piktybinių molekulių svyravimais ir nesąveikautų su sveikomis ląstelėmis...

A. PISKARSKAS

LAZERIAI: PASIEKIMAI, PERSPEKTYVOS

LAZERIO SUKŪRIMAS

Vienas didžiausių antrosios XX a. pusės atradimų — tai kvantiniai elektromagnetinių bangų generatoriai ir stiprintuvai. Dažnai šie prietaisai vadinami lazeriais ir mazeriais *. Juose taikomas naujas šviesos spindulio stiprinimo principas — atomų ir molekulių priverstinis elektromagnetinių bangų spinduliavimas, kurį teoriškai dar 1917 m. nagrinėjo Albertas Einšteinas. Galima sakyti, kad nuo tada prasidėjo lazerių kūrimo istorija. Ilgai į tą A. Einšteino darbą nebuvo kreipiama dėmesio, nes nebuvo žinoma, kaip sukelti ir panaudoti priverstinį spinduliavimą. Tik 1952 m. tarybiniai mokslininkai A. Prochorovas ir N. Basovas bei amerikiečių mokslininkai Č. Taunsas, Dž. Gordonas, H. Caigeris pasiūlė konkrečius būdus, kaip panaudoti priverstinį spinduliavimą elektromagnetinėms bangoms generuoti ir stiprinti. Per tolesnius dešimt metų buvo sukurti mazeriai, kurie veikė centimetrinių bangų diapazone, ir lazeriai, spinduliuojantys šviesos bangas. N. Basovui, A. Prochorovui ir Č. Taunsui už kvantinių generatorių sukūrimą buvo paskirta Nobelio premija.

Savotiškai įdomi šių prietaisų kūrimo istorija. Kadangi pasiūlytasis naujas elekromagnetinių bangų stiprinimo principas buvo neįprastas, be to, gimęs tuo metu egzotiškoje radiospektroskopijoje, tai pramonės laboratorijos šiuo atradimu menkai tesidomėjo. Tik 1954 m., Gordonui, Caigeriui ir Taunsui sukūrus pirmąjį veikiantį mazerį, kilo didžiulė susidomėjimo banga. Mazeriai greitai buvo pradėti naudoti ryšių bei lokacijos sistemose ir kaip labai tikslūs laiko etalonai.

1957 m. Č. Taunsas ir A. Šavlovas sumanė naująjį stiprinimo principą pritaikyti šviesos bangoms. Jų bendradarbiavimas buvo vaisingas, ir netrukus dienos šviesą išvydo naujas prietaisas — lazeris. Jis buvo toks nepaprastas, jog tik nedaugelis mokslininkų sugebėjo jį įvertinti. Vienos stambiausių JAV firmų „Bell Telephone" patentų skyrius iš pradžių net atsisakė išduoti išradimo pažymą, motyvuodamas tuo, kad tas prietaisas visiškai nenaudingas. Pra-

* Žodis „mazeris" yra sudarytas iš angliškos frazės „microwave amplification by stimulated emission of radiation" žodžių pirmųjų raidžių. Tai reiškia: „mikrobangų stiprinimas priverstiniu spinduliavimu"; terminas „lazeris" kilęs iš tos pačios frazės, žodį „microwave" pakeitus žodžiu „light" — šviesa.

ėjus keleriems metams, ypatingos lazerių savybės buvo deramai įvertintos — juos imta vartoti daugelyje mokslo ir technikos sričių.

Nauji mokslo atradimai kartais ilgai lieka nepritaikyti. Lazerių ir mazerių pavyzdys rodo, kad mes dar nesugebame įžvalgiai numatyti mokslo laimėjimų praktinių taikymų. Vertinant ir planuojant mokslinius tyrimus, pasitaiko apmaudžių klaidų. Štai 1933 m. branduolinės fizikos pradininkas E. Rezerfordas, apibūdindamas šios srities perspektyvas, pasakė: „Energija, išsiskirianti skylant atomui, nepaprastai maža. Kas tikisi, kad šis procesas taps energijos šaltiniu,— šneka niekus". Panašių apsirikimų mokslo ir technikos raidoje būta nemažai. O kartais vienašališkai įvertinama vien praktinė atradimo pusė ir užmirštama paties mokslo pažanga kaip indėlis į bendrą žmonijos kultūrą. Be to, nemenkas mokslo pažangos veiksnys — atsitiktinumas. Šis veiksnys, deja, mažai padėjo kuriant mazerius ir lazerius,— juk jie galėjo būti sukurti trisdešimčia metų anksčiau.

Baigiant pasakojimą apie lazerių kūrimą, norėtųsi retoriškai paklausti: kaip objektyviai vertinti, kiek vieni ar kiti mokslo tyrimai galės būti praktiškai taikomi ir kokią naudą atneš jie žmonijai? Skaitytojui gal įdomu, kaip į šį klausimą atsakė vienas iš lazerių kūrėjų Č. Taunsas. Pasak jo:

1. Žinios ir atradimai turi būti taip pat nuoširdžiai gerbiami, kaip ir praktiniai jų taikymai.

2. Jeigu norime visiškai išnaudoti žmogaus proto smalsumą, jo norą pažinti, turime pasitikėti talentingų ir sugebančių dirbti mokslininkų intuicija sprendžiant, kas yra įdomu ir vertinga.

3. Jeigu tauta nenori prarasti didžiausių mokslo atradimų, ji turi palaikyti tas mokslo šakas, kurios iš pirmo žvilgsnio atrodo nenaudingos, bet labiausiai stiebiasi į pažinimo saulę.

O dabar arčiau susipažinkime su lazeriu.

KAIP LAZERIS VEIKIA?

Šviesos prigimtis ir jos savybės — viena svarbiausiųjų fizikos problemų, sprendžiamų nuo seniausių laikų. Dvidešimtojo amžiaus pradžioje, remiantis M. Planko, N. Boro, A. Einšteino darbais, buvo sukurti šviesos spinduliavimo ir sugėrimo teorijos pagrindai. Buvo įrodyta, kad šviesa yra dvilypės — dalelių ir bangų — prigimties. Šviesa sklinda vakuume ir skaidriose medžiagose kaip elektromagnetinio lauko virpesiai (bangos), o atomai bei molekulės ją spinduliuoja ir sugeria atskiromis mažytėmis energijos porcijomis, kurias vaizduojamės kaip daleles — fotonus. Danų fizikas Nilsas Boras, remdamasis įvairių elementų šviesos spektrų tyrimais, įrodė,

kad vidiniams atomų procesams nusakyti netinka klasikinės fizikos dėsniai,— tinka tik kvantiniai dėsningumai.

Pagal Boro teoriją elektronai atome skrieja aplink branduolį ne bet kokiomis, o tik griežtai apibrėžtomis orbitomis. Tomis orbitomis jie skrieja pastoviai, turėdami tam tikrą energiją, kuri gali pasikeisti tik peršokus iš vienos orbitos į kitą. Tokių šuolių metu išspinduliuojamos arba sugeriamos elektromagnetinės bangos. Jeigu šuolis įvyksta tarp orbitų, kuriose elektronų energija yra atitinkamai E_1 ir E_2, tai išspinduliuoto arba sugerto fotono dažnis proporcingas šių energijų skirtumui, t. y.

$$\omega = \frac{E_2 - E_1}{\hbar};$$

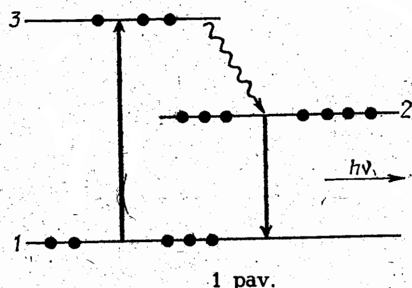
čia $\hbar$ — Planko konstanta.

Jei bent vienas atomo elektronas skrieja ne ta galima orbita, kuri yra arčiausiai branduolio, tai sakoma, kad atomas yra sužadintos būsenos, arba tiesiog sužadintas. Kvantinėje mechanikoje bet kokios sistemos, taigi ir atomo, energijos diskretinės vertės vadinamos energijos lygmenimis. Elektronai turi mažiausiai energijos, t. y. atomo energijos lygmuo žemiausias, kai jie skrieja artimiausia branduoliui orbita. Norint elektroną perkelti į vieną iš tolimesnių orbitų, t. y. sužadinti, reikia suteikti jam diskretinę energijos porciją — kvantą. Tai galima padaryti, pavyzdžiui, medžiagą kaitinant arba apšviečiant tam tikro bangos ilgio šviesa. Atomas negali ilgai būti sužadintas — jis vėl peršoka į normalią būseną, atitinkančią mažiausią energiją,— kaip sakoma, peršoka į žemiausią energijos lygmenį. Elektronui grįžtant į ankstesnę orbitą, atomas išspinduliuoja tiek pat energijos, kiek buvo sugėręs. Atomas gali būti sužadintas nuo 10^{-12} s iki kelių sekundžių. Šis laiko intervalas priklauso nuo atomo sandaros ir vadinamas sužadintos būsenos gyvavimo trukme. Kuo mažesnė tikimybė, kad atomas sugrįš į normalią būseną per laiko vienetą, tuo didesnė sužadintos būsenos gyvavimo trukmė. Būsenas, kurių gyvavimo trukmė didesnė kaip 10^{-8} s, įprasta vadinti metastabiliomis.

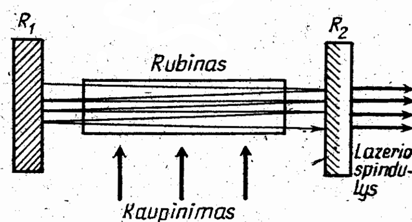
Kai daug atomų būna sužadinti vienu metu ir jų būsenos skirtingos, savaiminis spinduliavimas susijęs su šuoliais iš įvairių lygmenų nepriklausomai vienas nuo kito. Tuomet gauname įvairiaspalvį ir įvairiakryptį spinduliavimą (pavyzdžiui, taip spinduliuoja šviesą elektros lemputės įkaitęs siūlelis). Toks spinduliavimas vadinamas nekoherentiniu.

A. Einšteinas įrodė, kad, be savaiminio, gali būti ir priverstinis atomų spinduliavimas. Tai reiškia, kad sužadintą atomą galima priversti grįžti į normalią būseną anksčiau nei prasidės savaiminis spinduliavimas. Priverstinį spinduliavimą galima sukelti, pavyz-

džiui, paveikus sužadintą atomą šviesos kvantui, kuris atitinka sužadintosios ir nesužadintosios būsenų energijos skirtumą. Kiekvieno atomo priverstinis spinduliavimas yra to paties bangos ilgio, fazės ir krypties, kaip ir žadinantysis spinduliavimas. Tokį „visai vienodą" daugelio atomų spinduliavimą priimta vadinti koherentiniu. Jeigu daug atomų bus tos pačios sužadintos būsenos, tai ir vienas kvantas galės sukelti jų visų spinduliavimą vienu metu,— šviesa, sklindanti tokia sužadinta (aktyvia) medžiaga, stiprės. Beje, tai tikrai pasiekiama, kai būna sužadinti daugiau nei pusė atomų. Todėl šviesai stiprinti parenkamos savitos medžiagos, kurių ato-



1 pav.



2 pav.

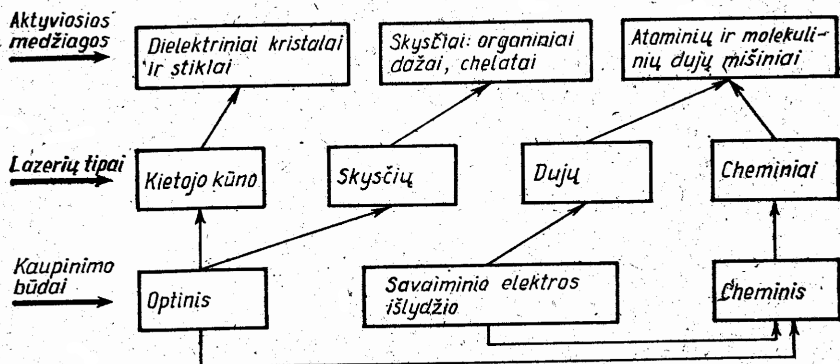
mai lieka sužadinti pakankamai ilgai. Jos apšviečiamos galingu (nekoherentiniu) spinduliavimu — taip gausiai sužadinami atomai. Tą procesą vadiname kaupinimu. Viena iš plačiai vartojamų lazerių technikoje medžiagų yra rubinas (aliuminio oksidas su chromo jonų priemaiša). Chromo jonų sužadintos būsenos pavaizduotos 1 pav.

Normalią, nesužadintą chromo jonų būseną atitinka žemiausias energijos lygmuo *1*. Apšvietus rubiną galingos lempos šviesa, chromo jonai sužadinami ir peršoka į lygmenį *3*. Iš čia dalis atomų savaime spinduliuodami grįžta į lygmenį *1*, o dalis peršoka į tarpinį lygmenį *2*, atiduodami energiją rubino kristalinei gardelei. Šuolio iš lygmens *3* į lygmenį *2* tikimybė yra 200 kartų didesnė, o iš lygmens *2* į lygmenį *1* — 300 kartų mažesnė, negu iš lygmens *3* į lygmenį *1*. Todėl lygmenyje *2* susikaupia daugiau sužadintų atomų, negu jų lieka lygmenyje *1*, ir susidaro sąlygos priverstiniams šuoliams. Tokios būsenos sistema labai nestabili: pirmas savaiminis šuolis sukels kitų atomų šuolius (spinduliavimą) ir prasidės atomų griūtis. Jeigu medžiaga bus tarp lygiagrečių veidrodžių R_1 ir R_2 (2 pav.), kurių vienas — pusskaidris, tai dalis priverstinio spinduliavimo fotonų išeis pro pusskaidrį veidrodį, o dalis atsispindės ir sukels kitų sužadintų atomų spinduliavimą. Lazerinis spinduliavimas stiprės tol, kol sužadinti atomai „išsikraus". O jeigu sužadintų

atomų skaičius bus pastovus (visą laiką kaupinant rubiną galinga lempa), už pusskaidrio veidrodžio matysime nenutrūkstamą raudonos spalvos spindulį.

LAZERIŲ RŪŠYS

Pateiktoje lentelėje (3 pav.) skaitytojas gali rasti visas pagrindines šiandien žinomas lazerių rūšis. Ten pat surašytos aktyviosios lazerių medžiagos ir įvairūs kaupinimo būdai. Daugiausia pastaruoju metu vartojami dujų (He-Ne, argono, anglies dioksido),

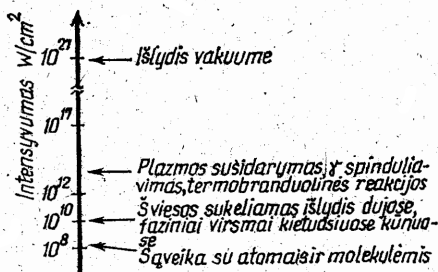


3 pav.

skysčių (organinių dažų) ir kietojo kūno (neodimio stiklo, granato su neodimiu, rubino, puslaidininkių) lazeriai. Spinduliuojamos bangos ilgis priklauso nuo atstumo tarp aktyviosios medžiagos atomų ar molekulių „darbinių" energijos lygmenų ir gali būti nuo 0,1 iki 200 mikrometrų, t. y. diapazone nuo vakuuminio ultravioletinio iki tolimo infraraudonojo spinduliavimo. Lazeriai gali spinduliuoti itin trumpus šviesos impulsus, kurių trukmė matuojama femtosekundėmis (viena femtosekundė — 10^{-15} s). Kalbant apie lazerių galią, reikia pasakyti, kad praktiškai plačiai taikomi ir mažos galios (10^{-3} W) dujų lazeriai, ir galingi (10^{6}—10^{3} W) kietojo kūno lazeriai. Specialiems fizikiniams tyrimams sudaromos lazerių sistemos, kurių galia siekia 10^{14}—10^{15} W. Lazerio spindulys nepaprastai mažos skleisties, todėl jį galima lęšiais sufokusuoti į mažutėlį (10^{-4} cm^2) plotą ir pasiekti intensyvumą 10^{17}—10^{18} W/cm^2. Tokios stiprios šviesos praktiškai neatlaiko jokia medžiaga — per pikosekundės (10^{-12} s) dalis ji išgaruoja ir virsta plazma. 4 pav. schemoje apytiksliai parodyta, kokie reiškiniai vyksta, veikiant įvairaus intensyvumo šviesai. Įdomiausia sritis — kai intensyvumas didesnis kaip 10^{20} W/cm^2 (praktiškai tai dar nepasiekta). Čia šviesa tu-

rėtų sąveikauti su branduolio elementariosiomis dalelėmis. Teoriškai įrodyta, kad 10^{27} W/cm^2 intensyvumo šviesos neatlaikytų net vakuumas — įvyktų išlydis.

Tarp įvairiausios paskirties ir konstrukcijos lazerių vertėtų atkreipti dėmesį į derinamuosius lazerius. Lazerio spinduliuojamos šviesos spalva, kaip žinome, priklauso nuo to, kiek „nukrinta" elektronas, šokdamas iš lygmens į lygmenį. Kadangi atomo energijos lygmenys griežtai apibrėžti, tai ir lazeris spinduliuoja tik tam tikro bangos ilgio (spalvos) šviesą. 1965 m. S. Achmanovui, R. Chochlovui ir šių eilučių autoriui pavyko sukurti naują lazerį, kurio spinduliuojamos šviesos spalvą galima tolydžiai keisti. Toks prietaisas buvo pavadintas parametriniu lazeriu ir dabar plačiai taikomas praktikoje. Parametriniu šis lazeris vadinamas todėl, kad, keičiant virpančius sistemos (elektrono atome arba molekulėje) parametrus, stiprinamas tam tikro dažnio virpesys. Bangos ilgis derinamas sukant aktyvųjį kristalą arba keičiant jo temperatūrą. Tiesa, yra rasta ir kitų būdų lazerių šviesos spalvai tolydžiai keisti, bet parametriniai lazeriai itin gerai veikia infraraudonojo spektro srityje. Juos kurdami ir taikydami, yra pasiekę žymių laimėjimų, pripažintų ir mūsų šalyje, ir užsienyje, Vilniaus universiteto fizikai. Jų sukurtieji parametriniai lazeriai yra ne tik tolydžiai keičiamo šviesos bangos ilgio, bet ir spinduliuoja nepaprastai trumpus — 100 femtosekundžių trukmės — impulsus.



4 pav.

Pastaruoju metu fizikai atakuoja naują bangų ilgių sritį — kuria Rentgeno ir γ lazerius. Iš tikrųjų, trumpiausio bangos ilgio (apie 400 Å) koherentinis spinduliavimas anksčiau buvo žadinanas keičiant ultravioletinį arba infraraudonąjį lazerių spinduliavimą dujų mišiniuose. Tačiau tokiu būdu sukeltasis spinduliavimas yra mažos galios ir nesiekia dar trumpesnių bangų srities. Todėl fizikai ieško būdų, kaip tiesiogiai sužadinti Rentgeno arba γ spinduliavimą (priminsime, kad Rentgeno spindulių ilgis yra nuo dešimčių iki dešimtųjų angstremo dalių, o γ — šimtosios ir tūkstantosios angstremo dalys). Sužadinti į tuos energijos lygmenis, iš kurių grįždami spinduliuoja Rentgeno ir γ kvantus, atomai ir branduoliai gyvuoja labai trumpai. Todėl, norint sukaupti daug sužadintų atomų ar branduolių, reikia labai galingo kaupiančiojo spindulia-

vimo. Pirmą kartą galingas lazerinis Rentgeno spindulys blykstelėjo 1981 m. požeminio branduolinio sprogimo epicentre. Sprogimo sužadintas nekoherentinis Rentgeno spinduliavimas kaupino specialaus metalų lydinio strypus, kuriuose ir buvo sužadintas lazerinis Rentgeno spinduliavimas. Jo galia siekė 10^{13} W. Suprantama, šis lazeris veikė tik kartą. Fizikai suka galvas, kaip tokį branduolinį sprogimą sukelti uždarame tūryje ir valdyti taip, kad Rentgeno lazeris galėtų veikti daug kartų nesuirdamas. γ lazeris dar nesukurtas. Ieškoma tokių branduolių, kurie ilgai gyvuotų sužadinti metastabiliose energijos būsenose, taigi nereikėtų didelės kaupinimo galios. Visiškai aišku, kad, sukūrus Rentgeno ir γ lazerius, atomo ir branduolio fizikoje įvyks ne mažesnis perversmas kaip ir sukūrus elementariųjų dalelių greitintuvus.

LABAI SPARČIŲ VYKSMŲ FIZIKA

Viena iš jauniausių fizikos sričių, kurios audringą plėtrą skatina lazeriai,— tai labai sparčių vyksmų atomuose ir molekulėse tyrimai.

Optikoje vyksmas laikomas labai sparčiu, jei jis trunka maždaug dešimtis pikosekundžių. Branduolio fizikai žino ir spartesnių procesų. Taigi kas gali nutikti atomui ar molekulei per vieną pikosekundę? Per tiek laiko sužadinti atomai gali išspinduliuoti energijos perteklių ir sugrįžti į žemiausią energijos lygmenį; sužadinta molekulė savo energijos perteklių atiduoti kitoms gretimoms molekulėms; molekulės branduolių virpesių energija gali virsti šilumine arba, jei virpesiai labai stiprūs, molekulė gali suskilti. Tokių labai sparčių energijos perdavimo ir išsisklaidymo vyksmų yra gana daug. Jų tuo daugiau ir jie tuo spartesni, kuo sudėtingesnė molekulė ar molekulių junginys. Pavyzdžiui, labai įdomūs ir sudėtingi energijos mainai ir virsmai stebimi augalų ir gyvūnų ląstelėse, vykstant pirminėms su gyvybine veikla susijusioms reakcijoms.

Itin spartūs vyksmai tyrinėjami įvairiais metodais, bet visi jie panašūs. Pirmiausia tiriamajam objektui suteikiamas trumpas energijos impulsas: pavyzdžiui, kietasis kūnas arba biologinė ląstelė apšvitinami trumpu elektronų, Rentgeno spindulių arba šviesos impulsu. Po to įvairiais būdais (optiniais, elektriniais, mechaniniais, cheminiais) tiriama (zonduojama), kaip pakinta daiktų savybės, parametrai. Šis metodas vadinamas „smūginiu". Taip stebimas vandens paviršiuje susidariusių bangų, įmetus akmenį, gesimas. Šiuo būdu tyrinėjami ir labai spartūs vyksmai biologiniuose objektuose — ląstelėse, molekulių junginiuose, paveikus juos trumpu lazerio šviesos impulsu. Pirmąjį mūsų šalyje pikosekundinį lazerinį spek-

trometrą suprojektavo ir pagamino 1976 m. Vilniaus universiteto fizikai. Ir tiriamajam objektui žadinti, ir jam zonduoti jie panaudojo jau minėtus parametrinius lazerius. Taigi šiuo prietaisu mokslininkai gali ne tik paveikti tiriamąjį objektą įvairios spalvos šviesos impulsais, bet ir fiksuoti itin sparčius jo spalvų kitimus įvairiose spektro srityse. Labai įdomūs bandymai buvo atlikti su molekulių junginiais, išskirtais iš atliekančių fotosintezę bakterijų,— su vadinamaisiais chromatoforais. Chromatoforai tiekia bakterijai elektros energiją. Jie sudaryti ir chlorofilo molekulių ir vadinamojo reakcinio centro. Chlorofilo molekulės sugeria saulės šviesą ir perduoda sukauptą energiją į reakcinį centrą, kuriame dėl to atsiranda laisvų elektronų. Pastarieji sukelia ląstelėje biochemines reakcijas, per kurias išsiskiria energija, reikalinga gyvybei palaikyti. Anksčiau buvo nežinoma, kaip ilgai trunka energijos perdavimas iš chlorofilo molekulių į reakcinį centrą, taip pat buvo neaišku, kaip ir kokiais keliais keliauja elektronas reakciniame centre. Visa tai padėjo išaiškinti lazerinis pikosekundinis spektrometras: trumpas lazerio žybsnis sužadina pradinius fotosintezės vyksmus, kiek vėliau kitas daugiaspalvis lazeris analizuoja, kas pasikeitė bandinyje, praėjus kelioms ar kelioms dešimtims pikosekundžių po sužadinimo. Dažniausia po pradinių fotosintezės vyksmų pasikeičia chromatoforų sugėrimo spektrai. Užregistravę tuos pakitimus, mokslininkai „iššifruoja", kaip elektronai išlaisvinami ir kaip keliauja, vykstant fotosintezei.

Neįmanoma čia aprėpti visų labai sparčių vyksmų fizikos problemų. Paminėsime dar vieną, sprendžiamą taip pat ir mūsų fizikų — atrankinio lazerių spinduliavimo poveikio molekulėms problemą. Jos esmė štai kokia: parinkus pakankamai trumpą, galingą ir reikiamo bangos ilgio šviesos impulsą, galima taip paveikti sudėtingą molekulę, kad ji suskiltų, ir ne bet kaip — nutrūktų tam tikras norimas cheminis ryšys. Taip būtų galima valdyti chemines reakcijas, netgi kryptingai keisti genetinį kodą. Praktiškai tai įvykdyti labai sunku, nes sudėtingoje molekulėje gautoji žadinimo energija akimirksniu (greičiau nei per vieną pikosekundę) „pasiskirsto" — virsta įvairių virpesių energija, ir molekulė skyla ne toje vietoje, kur mums reikia, o ten, kur silpniausias ryšys. Todėl šiai idėjai įgyvendinti reikia labai galingų (10 ir daugiau GW) derinamo bangos ilgio infraraudonosios šviesos impulsų, trunkančių trumpiau nei 100 femtosekundžių. Tokius lazerius neseniai sukūrė Vilniaus universiteto fizikai.

Kita vertus, norint kryptingai keisti, t. y. atrankiai skaldyti molekules, reikia labai gerai žinoti jų energijos būsenas ir kaip molekulės į jas grįžta. Vaizdžiai tariant, reikia žinoti visus energijos „nutekėjimo vamzdelius", kad juos būtų galima „užkimšti". Tam

tikslui daromi spektroskopiniai kinetiniai tyrimai, apie kuriuos truputį kalbėjome šio skyriaus pradžioje. Kartais šie tyrimai vadinami pikosekundine spektroskopija.

Dabar šių tyrimų svorio centras jau persikelia į femtosekundžių sritį, taigi būtų tikslinga kalbėti apie femtosekundinę spektroskopiją. Čia sunkiausia — gauti femtosekundinius šviesos impulsus ir juos stebėti. Teoriškai mažiausia šviesos impulso trukmė gali būti 10^{-15} s, t. y. 1 fs,— tiek trunka keli šviesos bangos virpesiai. Tačiau praktiškai tai pasiekti sunku. Šiuo metu trumpiausia pasiekta laboratorijose trukmė — 30 fs (S. Šenkas, JAV), Vilniaus universitete — 100 fs (V. Sirutkaitis, A. Piskarskas). Kuo trumpesnis impulsas, tuo sunkiau derinti bangos ilgį. Autoriaus laboratorijoje gauti rezultatai rodo, kad šiuo atžvilgiu parametriniai lazeriai yra patogesni už dažų lazerius, kurie yra taikomi JAV. Dar viena kliūtis, su kuria susiduria mokslininkai femtosekundžių srityje,— tai impulsų trukmės pailgėjimas. Mat 1 fs trukmės impulsas, sklisdamas ore 1 m atstumą, pailgėja 50 kartų, o vandenyje ir stikle — 5000 kartų. Taigi femtosekundinius impulsus reikia sudarinėti vakuume ir, dirbant su jais, negalima naudoti stiklinių prizmių, lęšių ir pan. Tačiau įveikti visus sunkumus skatina femtosekundinių impulsų taikymo perspektyvos. Svarbiausia tai, kad kuo trumpesnis impulsas, tuo mažiau jis pavojingas gyvajai ląstelei, vadinasi, tikimasi išmokti paveikti gyvą organizmą jo nesužalojant.

E. NORVAIŠAS

KĄ MES ŽINOME IR KO NEŽINOME APIE ATOMO BRANDUOLĮ

Kartą mokiniai paklausė išminčiaus, kodėl jis sakosi daugiausiai iš visų nežinąs. Mokytojas smėlyje nubrėžė didelį apskritimą ir keletą mažesnių. „Didysis apskritimas — mano žinios, mažieji — jūsų, o visa kita — nežinojimo jūra,— tarė jis.— Matote, mano žinias nuo nežinojimo skirianti riba daug ilgesnė negu jūsų". Ši legenda puikiai tinka ir branduolio fizikai. Daug fizikų dirba šioje srityje. Sukaupta aibė įvairių teorinių branduolio modelių, o neatsakytų klausimų tik gausėja.

Paprasčiausias kelias, atrodytų,— viską pamatyti savo akimis. Ar nebūtų galima sukurti galingą mikroskopą ir, padidinus branduolio atvaizdą, ištirti jį? Deja, šitoks problemos sprendimo būdas negalimas. Atomo branduolio skersmuo — vos keletas kvadrilijonųjų (10^{-15} m) metro dalių, o regimosios šviesos bangos ilgis didesnis negu $4 \cdot 10^{-7}$ m. Sklisdama šviesos banga nepajus šimtus milijonų kartų mažesnio branduolio, vadinasi, regimoji šviesa įsivaizduojamam mikroskopui netinka. Jis turėtų „išžvalgyti" branduolio vidų bangomis, kurių ilgis — mažiau kaip 10^{-15} m. Kuo trumpesnės būtų bangos, tuo ryškesnį vaizdą galėtume stebėti. Galbūt branduoliui stebėti tinkamas elektroninis mikroskopas? Mikropasaulyje, kaip žinome, negalioja Niutono klasikinė mechanika — jį tvarko kvantinės mechanikos dėsniai. Mikropasaulio objektai, priklausomai nuo eksperimento sąlygų, gali pasireikšti kaip dalelės arba kaip bangos. Pagal L. de Broilio lygybę kiekvieną dalelę atitinka banga, ir atvirkščiai — kiekviena banga perneša judesio kiekį bei masę, t. y. turi dalelės savybių. Kokio ilgio de Broilio bangos atitinka elektronus? Tai priklauso nuo elektronų energijos. Iš L. de Broilio lygybės apskaičiuojame elektronų, kurie „užčiuoptų" branduolį, energiją. Ji turi būti ne mažesnė kaip 1200 MeV $= 1{,}2\ 10^{9}$ eV. Taigi atsakymas nepalieka jokių vilčių, šie milžiniškos energijos elektronai tiesiog suskaldytų bet kurį branduolį. Panašias išvadas gausime savo tyrimo įnagiu pasirinkę bet kurias kitas daleles.

Vadinasi, tenka susitaikyti su mintimi, kad branduolio niekada nepamatysime. Belieka netiesioginiai stebėjimo metodai. Kaip iš baltos juostos danguje sprendžiame, jog ten praskrido reaktyvinis lėktuvas, taip ir fizikai iš branduolių ir elementariųjų dalelių pėdsakų Vilsono kameroje, fotografinėje emulsijoje ar kibirkštinėje

kameroje, iš jų poveikio prietaisams sprendžia apie tyrimo objektus. Patyręs puodžius, atsargiai stuksendamas puodą, sužino jo savybes. Taip fizikai, apšaudydami branduolius lengvomis mažos energijos dalelėmis arba galingais smūgiais daužydami juos ir tyrinėdami išlėkusias skeveldras, mėgina nustatyti branduolių savybes.

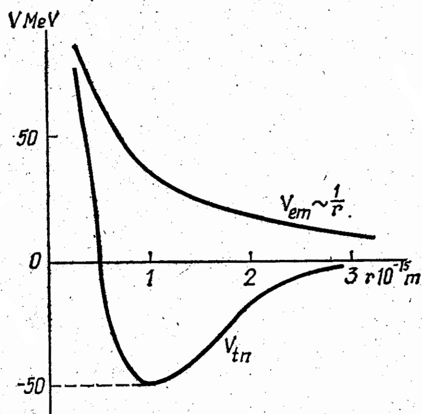
Prisiminkime: juk šiuo metodu buvo išaiškintas branduolių buvimas. 1911 m. E. Rezerfordas savo puikiais eksperimentais įrodė, kad pagrindinė atomo masė ir teigiamas krūvis sukoncentruoti branduolyje, kuris dešimtis tūkstančių kartų mažesnis už atomą. Tai buvo nuostabių atradimų laikai. 1913 m. N. Boras pasiūlė planetinį atomo modelį, paaiškinantį atomų spektrus. Šiandien šis modelis atrodo primityvus, bet visa tolesnė mokslo raida patvirtino svarbiausias E. Rezerfordo ir N. Boro išvadas. O tuomet daug kas buvo neaišku. Kodėl neigiamas elektronas nenukrinta ant teigiamo branduolio? Kodėl elektronai, besisukdami apie branduolį, nespinduliuoja elektromagnetinių bangų, kaip turėtų būti pagal klasikinės elektrodinamikos dėsnius? Į šiuos klausimus tik vėliau atsakė kvantinė mechanika.

Taigi žinome, kad atomas turi mažytį branduolį. Bet iš ko sudarytas branduolys? Gal jis elementarus ir nedalomas? 1919 m. E. Rezerfordas parodė, kad α dalelės gali sudaužyti azoto branduolį. Teisingiau, α dalelė, įsiskverbusi į branduolį, iš jo išmuša protoną, ir azoto branduolį paverčia deguonies branduoliu. Tokiu būdu buvo akivaizdžiai įrodyta, kad branduolys turi savo struktūrą ir į jo sudėtį įeina protonas, be to, vieni branduoliai gali virsti kitais. Kai 1932 m. buvo atrastas elektrinio krūvio neturintis neutronas, tais pačiais metais V. Heizenbergas ir nepriklausomai tarybinis mokslininkas D. Ivanenka pasiūlė hipotezę: branduolys sudarytas iš protonų ir labai į juos panašių neutronų. Šios abi dalelės dar vadinamos nukleonais. Kodėl teigiami elektringi protonai ir neutralūs neutronai neišsisklaido? Čia susiduriame su naujomis jėgomis. Tai stiprios jėgos, stipresnės už elektromagnetines jėgas. Nukleonai branduolyje taip stipriai vienas kitą traukia, kad sumažėja jų bendra masė. Prieš šitokį teiginį dar praėjusio amžiaus fizikai visi kaip vienas būtų protestavę, o šiandien terminas „masės defektas" (skirtumas tarp laisvų nukleonų masių sumos ir branduolio masės) tapo įprastu. Žinodami branduolių mases, pagal A. Einšteino formulę $\Delta E = \Delta mc^2$ galime apskaičiuoti, kiek energijos atsipalaiduos protonams ir neutronams jungiantis į branduolius (čia Δm — masės defektas, ΔE — ieškomoji energija).

Paradoksalu, bet branduolio fizikos kūrėjas E. Rezerfordas laikė, kad neįmanoma branduolio energijos panaudoti praktiškai. Tuo tarpu šiandien veikia šimtai atominių elektrinių, didžiulės moksli-

ninkų pastangos dedamos siekiant įvaldyti termobranduolinę reakciją. Labiausiai domimasi $^2H+^3H \rightarrow ^4H+n+17{,}6$ MeV reakcija, kurios metu dviejų vandenilio izotopų, deuterio ir tričio, branduoliai jungiasi į helio branduolį išmesdami neutroną ir didžiulį kiekį — 17,6 MeV energijos. Vienas gramas šitokio branduolinio „kuro" duotų 10^6 kW·h energijos. Štai kiek energijos glūdi branduolyje!

Apie branduolines jėgas ir šiandien žinome nedaug. Žinome, kad jos šimtus kartų stipresnės negu elektromagnetinės prigimties jėgos. Štai kodėl branduoliai tokie stabilūs. Tiesiogiai išmatuoti šių jėgų neįmanoma. Šiame sunkiame etape fizikams padeda matematika, tiksliau matematinė dalelių sklaidos teorija. Apšaudydami branduolius arba atskirus nukleonus įvairių energijų dalelėmis ir išanalizavę eksperimentų duomenis, fizikai nustatė, kad ne tik branduolinių jėgų stiprumas, bet ir kryptis priklauso nuo atstumo. Branduolio fizikoje, beje, kaip ir elektrodinamikoje, labiau priimta kalbėti apie nukleonų tarpusavio sąveikos potencialą. Jeigu potencialas teigiamas, dalelės viena kitą stumia, jeigu neigiamas,— traukia. Iš branduolio tarpnukleoninės sąveikos potencialo V_{tn} grafiko (1 pav.) matome, kad arčiau kaip $0{,}5 \cdot 10^{-15}$ m atstumu esantys nukleonai vienas kitą stumia, toliau esantys — traukia, ir pakankamai toli, daugiau kaip $3 \cdot 10^{-15}$ m atstumu esantys nukleonai vieni kitų neveikia. Palyginimui nubrėžtas šimtus kartų padidintas elektromagnetinis potencialas V_{em}, kuris nusako dviejų protonų stūmos jėgas. Branduolinės jėgos vadinamos artiveikėmis, nes jos aptinkamos ne didesniu kaip $3 \cdot 10^{-15}$ m atstumu.



1 pav.

Reikia pastebėti, kad pateiktieji atstumai nėra absoliučiai teisingi. Daugelyje pasaulio mokslo centrų įvairiais būdais tiriamas branduolys. Spręsti atvirkštinį sklaidos uždavinį, t. y. nustatyti jėgų priklausomybę nuo atstumo pagal sklaidos eksperimento duomenis yra labai sudėtinga. Todėl ir gautieji rezultatai skiriasi. Nurodytieji atstumai tik nusako branduolinių jėgų veikimo pobūdį. Kartais gali atrodyti, kad apie branduolį nieko nežinome, kad visos mūsų žinios — tik spėlionės. Taip nėra. Branduolio fizika kūrėsi ne tuščioje vietoje. Fizikai ištikimai tarnauja seni, bet visada

geri energijos, judesio kiekio momento tvermės dėsniai. Kol kas nėra pagrindo abejoti, kad ir kvantinės mechanikos dėsniai tinka branduolio reiškiniams.

Pamėginkime įsivaizduoti, kaip atrodo branduolys. Visų pirma reikia atsiminti, kad teks vadovautis kvantinės mechanikos dėsniais ir „kvantine" logika. Tai reiškia: mūsų vaizdūs samprotavimai bus tik apytikriai. Pirma įdomi išvada — tai atsakymas į klausimą, ar protonai ir neutronai branduolyje įtvirtinti, ar juda?

Klasikinėje mechanikoje dalelės judėjimą kiekvienu laiko momentu nusako koordinatė x ir judesio kiekis p, kuriuos galima tiksliai išmatuoti. Visai kita situacija kvantinėje mechanikoje. Čia judesio kiekio ir koordinatės tuo pačiu metu tiksliai išmatuoti negalima. Ir ne tik išmatuoti, bet ir apskritai kvantiniam objektui šiuos du dydžius galima priskirti ne didesniu tikslumu kaip leidžia Heizenbergo nelygybė $\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2}$; čia Δx ir Δp — koordinatės ir judesio kiekio neapibrėžtumai, o $\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22}$ MeV · s — Planko konstanta. Jeigu nukleonas yra $4 \cdot 10^{-15}$ m skersmens branduolyje, tai $\Delta x = 4 \cdot 10^{-15}$ m ir, žinodami nukleono masę, galime apskaičuoti greičio neapibrėžtumą $\Delta v = 1300$ km/s. Vaizdžiai kalbant, nukleonai, atsitrenkdami vienas į kitą, sustodami, pasiekdami ir viršydami 1300 km/s greitį, juda branduolyje. Tai milžiniškas greitis, todėl ir reikalingos stiprios branduolinės jėgos, išlaikančios nukleonus kartu. Reikia pripažinti, kad mūsų besiblaškančių nukleonų branduolio vaizdinys labai apytikris. Jo tenka griebtis, kai negalime užrašyti, kaip reikalauja kvantinė mechanika, banginės funkcijos ir spręsti Šredingerio lygties. Plačiau kvantine mechanika besidominčiam skaitytojui galime rekomenduoti L. Ponomariovo knygą „Anapus kvanto". Joje nuodugniai nagrinėjama ir Heizenbergo nelygybė bei jos interpretacijos.

Tikriausiai nenuostabu, kad vienas iš pirmųjų branduolio modelių buvo „sferinio lašo" modelis. Panašiai kaip vandens molekulės laše, protonai ir neutronai juda branduolyje, apribotame sferos paviršiaus. Tokio protoninio-neutroninio „skysčio" tankis visur vienodas. Mažai nukleonų turintis branduolys mažas, daugiau jų turintis — didesnis. Tokiu atveju turėtų galioti paprasta taisyklė: branduolio sferos tūris proporcingas nukleonų skaičiui. Iš šio modelio išplaukia kitos išvados: teigiamas elektros krūvis pasiskirstęs tolygiai; branduoliuose, kuriuose neutronų daugiau negu protonų, krūvio tankis mažesnis. Neutronas ar protonas (jeigu pakankamai greitas ir nugali elektrines stūmos jėgas), prasiskverbęs į branduolį, atneštą energiją perduoda visiems nukleonams. Jeigu vienas ar keli nukleonai dėl judėjimo chaotiškumo gauna pakankamai atneštos energijos, jie išsiveržia iš branduolio, įvyksta vadinamoji

branduolinė reakcija. Visus šiuos samprotavimus iš dalies patvirtino eksperimentai. Iš dalies todėl, kad vargu ar buvo galima tikėtis, jog branduolys yra paviršiaus apribotas kūnas. Nukleonai nėra biliardo rutuliai, sukrauti į branduolio maišą. O ir branduolinėse reakcijose ne viskas taip paprasta.

Buvo pastebėta, kad ne visi branduoliai vienodai stabilūs: vieniems suskaldyti arba išmušti bent vieną nukleoną reikia daugiau energijos, kitiems mažiau, kai kurie net patys suskyla. Ypač stabilūs tie branduoliai, kurių protonų arba neutronų skaičius yra

2; 8; 20; 28; 50; 82; 126.

Gamtoje yra daug izotopų, turinčių šitiek nukleonų. Branduolio „sferinio lašo" modelis negalėjo paaiškinti, kuo šie skaičiai ypatingi, gal todėl jie buvo pavadinti magiškais skaičiais. Fizikams jau yra tekę susidurti su panašiu reiškiniu. Atome elektronai sudaro sluoksnius. Atomai, kurių elektronų sluoksniai užpildyti, pasižymi ypatingu inertiškumu — tai chemiškai neaktyvių inertinių dujų atomai. Todėl buvo pasiūlytas tobulesnis sluoksninis branduolio modelis. Pagal kvantinės mechanikos principus kiekvienas nukleonas apibūdinamas savais kvantiniais skaičiais. Įdomiausia, kad tie kvantiniai skaičiai, apibūdinantys energiją, judesio kiekio momentą, ir t. t., gali įgyti tik tam tikras diskretines vertes. Tarpinių verčių negali būti, taigi ir energija bei kiti dydžiai keičiasi šuoliais (porcijomis — kvantais). V. Paulio principas draudžia dviem nukleonams būti visai toje pačioje būsenoje, t. y. turėti visus vienodus kvantinius skaičius. Šis principas ir verčia nukleonus užimti vis aukštesnius ir aukštesnius energijos lygmenis, kai žemesnieji užpildyti. Vienodos energijos, bet su kai kuriais skirtingais kvantiniais skaičiais, nukleonai ir sudaro sluoksnius. Ilgainiui ir šis branduolio modelis nebegalėjo paaiškinti naujų eksperimentinių faktų.

Pamažu buvo prieita prie minties, kad branduolyje nukleonai nustoja savo individualumo — jų judėjimas yra kolektyvinis, ir tai branduolio savybėms turi lemiamą reikšmę. (Įsivaizduokime bandą. Kiekvienos avies elgesys mūsų nedomina, — svarbu tik visos bandos judėjimas, jos forma.) Iš naujomis idėjomis pagrįsto modelio galima spręsti, kad branduolys gali būti ne sferiškai simetriškas, bet deformuotas. Tai patvirtina daugelis eksperimentinių duomenų. Branduolys gali suktis, netgi pulsuoti, ir dėl to branduolių energijos spektruose atsiranda linijų, susijusių su sukamuoju ir svyruojamuoju judėjimu. Taigi kiekvienas modelis, tos prielaidos, kuriomis jis pagrįstas, tikrinamas eksperimentiniais faktais. Gerai suprantama fizikų svajonė be prielaidų, remiantis tik bendrais kvantinės mechanikos dėsniais, paaiškinti branduolio savybes. Deja, tai be galo sudėtingas uždavinys. Netgi tarus, jog

apie nukleonų tarpusavio sąveiką viską žinome, N nukleonų branduolį turėtume aprašyti $3N$ kintamųjų (neįskaitant sukininių ir izosukininių kintamųjų, kurie aprašo nukleonų vidinius laisvės laipsnius, ir pradiniam problemos suvokimui nebūtini) diferencialine lygtimi. Šios lygties niekas negali išspręsti ir vargu ar per artimiausius šimtmečius galės. Vadinasi, visais kuriamais modeliais iš esmės stengiamasi taip uždavinį supaprastinti, kad bent artutiniais metodais mokėtume jį spręsti. Mikroskopiniame-kolektyvinio branduolio modelyje mėginama išskirti keletą esminių nukleonų kolektyvinio judėjimo kintamųjų ir jiems spręsti uždavinį. Sprendiniai vėl lyginami su eksperimentų duomenimis.

Šioje srityje darbuojasi ir LTSR MA Fizikos instituto Atomo branduolio teorijos skyriaus mokslininkai. Pasirodo, kad branduolio fizikoje labai svarbios simetrijos. Jos gali būti įvairios: nuo paprasčiausių, aprašančių branduolio formą, nuo perstatymo simetrijos, dėl kurios branduolio banginėje funkcijoje sukeitus nukleonus vietomis, keičiasi funkcijos ženklas (Paulio principo matematinė išraiška), iki įvairių tik grupių teorijos kalba aprašomų simetrijų. Jos dažnai supaprastina uždavinį, ir ne tik tai. Gali būti, kad tokios simetrijos būdingos mus supančiam pasauliui. Gal tai simetrijos, kurių taip intensyviai ieškoma elementariųjų dalelių fizikoje? Mūsų respublikos teoretikai sėkmingai taiko grupių teorijos metodus branduolio struktūrai tyrinėti.

Branduolyje protonai ir neutronai suspausti labai mažame tūryje. Nenuostabu, jog jie elgiasi ne kaip atskiros dalelės, o sudaro vadinamąją branduolinę materiją, kurios tankis apie $2 \cdot 10^{17}$ kg/m^3. Kubinis centimetras „supakuotų" šalia vienas kito branduolių svertų 200 000 000 tonų! Šiuo metu audringai vystosi nauja didelių energijų jonų fizika. Labai jonizuoti atomai, t. y. atomai, iš kurių atplėšta daugelis elektronų, pagreitinti iki didžiulių energijų, smogia vienas į kitą. Tada susidaro naujas tarpinis greitai suskylantis branduolys. Tarp skilimo produktų atrasta naujų, gamtoje nesutinkamų branduolių. Naujajai fizikos tyrimų sričiai būdingi didžiuliai materijos tankiai, milžiniški greičiai, o procesai vyksta per 10^{-21} s. Tokiomis ekstremaliomis sąlygomis tikrinami žinomi dėsniai, ieškoma naujų. Branduolio fizika yra palyginti jauna, sparčiai besivystanti mokslo šaka. Apie tai byloja ir branduolio modelių kaleidoskopas. Viename žinių etape buvęs geras modelis naujame etape tobulinamas arba net pakeičiamas nauju. Tokia jau mokslo vystymosi dialektika. Dažnai tenka grįžti prie problemų, kurios atrodė seniai išspręstos. Geras mokslo vingių pavyzdys yra LTSR MA Fizikos instituto Radioaktyvaus spinduliavimo skyriaus mokslininkų darbai. Nuo seno buvo „žinoma", kad branduoliuose vykstantys procesai nepriklauso nuo aplinkos:

pavyzdžiui, nesvarbu, ar medžiagą šildome, ar šaldome,— branduolių skilimo greitį apibūdinančios konstantos nesikeičia. Tuo nepatikėjo mūsų eksperimentatoriai. Jie ištyrė radioaktyvius atomo branduolius įvairiuose cheminiuose junginiuose ir aptiko 0,01 % nukrypimų. Nors radioaktyvaus skilimo konstantų pokyčiai nežymūs, faktai apie juos padeda giliau suvokti branduolinius procesus.

Paprasčiausias klausimas, kas iš ko sudarytas, didelių energijų fizikoje tampa problemiškas; susidūrus didelės energijos elektronui su pozitronu (teigiamu elektronu), gali atsirasti įvairių dalelių, tarp jų netgi protonas ir neutronas, kurių rimties masė porą tūkstančių kartų didesnė už elektrono ir pozitrono rimties mases. Susidūrus didelių energijų branduoliams, gali atsirasti dalelių, kurių branduolyje galbūt ir nėra. Aišku, šie procesai vyksta ne chaotiškai, o pagal žinomus ir dar nežinomus dėsnius. Šiandieninė branduolio teorija fizikų nepatenkina, laukiama naujų idėjų ir teorijos, galinčios atsakyti į šiandien rūpimus klausimus. O su kiekvienu atsakymu tikriausiai iškils vėl naujų klausimų, apie kuriuos šiandien net nenutuokiame. Tuo ir patrauklus mokslo kelias.

K. MAKARIŪNAS

MIKROPASAULIS PER 20 METŲ

Kad įsivaizduotume, kas dėjosi mikropasaulio fizikoje per paskutinius 20 metų, pabandykime išvardyti bent svarbiausius atradimus, hipotezes, teorijas, iškilusias naujas problemas. Kvarkai. Žaviosios dalelės. Gražiosios dalelės. Pažanga kuriant gamtos jėgas suvienijančias teorijas, elektrosilpnųjų sąveikų teorija. Elementariųjų dalelių faziniai virsmai. Kvantinė chromodinamika. Gliuonai. Supersunkusis leptonas. Neutrino rimties masė. Protono stabilumo problema. Aišku, visko neaprėpsi. Bet ir šito užtenka, kad suvoktume, jog prabėgo labai neramus dvidešimtmetis, dosnus atradimų ir naujų idėjų.

Per praėjusius dvidešimt metų gausiausias elementariųjų dalelių (smulkiausių materijos dalelyčių) būrys prarado teisę vadintis elementariosiomis dalelėmis. Tai — hadronai, dalelės, tarp kurių veikia vadinamosios stipriosios jėgos. Hadronams priklauso kiekviename atome esantis protonas, neutronas, įvairūs hiperonai (šios dalelės vadinamos bendru barionų vardu) ir mezonai. Jeigu šiandien visos šios dalelės dar vadinamos elementariosiomis, tai tik iš įpratimo (kad nebūtų painiavos, tikrai elementarios dalelės kartais vadinamos fundamentaliosiomis, arba pagrindinėmis). Nauji atradimai ir pažanga, kuriant gamtos jėgų teorijas, visiškai pakeitė mikropasaulio vaizdą.

KAIP TIRIAMAS MIKROPASAULIS

Kaip ir bet kurią sritį, mikropasaulį tyrinėja ir fizikai teoretikai, ir eksperimentatoriai. Juokaujama, kad jie skiriasi tuo, jog vieni nemoka naudotis prietaisais, o kiti nemoka matematikos. O jeigu rimtai,— tai pirmieji labai gerai moka jiems reikalingą matematiką, o antrieji ne tik naudojasi reikalingais prietaisais, bet ir juos kuria.

Teoretikams sukurti mikropasaulio vaizdą bene daugiausia padeda jo dalelių ir reiškinių simetrijos nagrinėjimas. Simetrijų yra visokiausių: veidrodinė (daikto ir jo atspindžio veidrodyje simetrija), sukimo (pavyzdžiui, pasukę šešiakampę žvaigždę 60° kampu, matysime tokį pat vaizdą), dalelių ir antidalelių (pakeitus visas daleles antidalelėmis, tarp jų veikiančios jėgos nepakinta) ir kt. Si-

metrija nagrinėjama pasitelkus labai abstrakčias matematines teorijas, vadinamas grupių teorijomis.

Eksperimentinės (gautos iš stebėjimų ir matavimų) žinios apie elementariąsias daleles ir tarp jų veikiančias jėgas gaunamos tiriant dalelių susidūrimus, nes naujos dalelės gimsta, kai susidūrusios „sudūžta" kitos dalelės. Fizikas eksperimentatorius, norintis sužinoti kokios nors dalelės sandarą, elgiasi ne ką gudriau kaip vaikas, kuriam smalsu sužinoti, kas yra žaisliuko viduje. Vaikas žaislą išardo, sudaužo. Fizikas eksperimentatorius daro panašiai — trenkia vieną dalelę į kitą. Jei smūgis silpnas, nieko ypatingo neatsitinka, dalelės tik atšoka viena nuo kitos. Tai tamprusis susidūrimas. Tiriant tokius susidūrimus, 1973 metais buvo padarytas vienas egzotiškiausių atradimų — neutrino (tiksliau, miuoninio neutrino) ir elektrono sąveika: buvo pastebėta, kad elektronas atšoka nuo pralekiančio neutrino. O juk neutrinas taip silpnai sąveikauja su kitomis dalelėmis, kad net visas Žemės rutulys jam yra beveik skaidrus. . . Šis atradimas, specialistų vadinamas neutraliųjų silpnųjų srovių atradimu, patvirtino naujųjų mikropasaulio teorijų išvadas, kad turinti egzistuoti dar nežinoma neutrali (neturinti elektros krūvio) dalelė, pernešanti neutrino ir elektrono sąveikos jėgas — vadinamasis neutralusis tarpinis Z^0 bozonas.

Kai smūgis būna stipresnis, iš dalelių išlekia jų sudėtinės dalys. Taip vyksta branduolinės reakcijos: iš atomų branduolių išlekia protonai, neutronai ir kitos jų skeveldros. Kai smūgis labai stiprus, kartais išlekia netgi tai, ko dalelės viduje nebuvo,— panašiai kaip lekia žiežirbos, trenkus geležimi į akmenį. Gimsta naujos dalelės. Jos atsiranda susidūrusių dalelių kinetinės (judėjimo) energijos sąskaita: juk su bet kokia energija yra susijusi masė, o masėje yra sutelkta energija (pagal žinomą Einšteino formulę $E=mc^2$, kurioje E — energija, m — masė, c — konstanta, lygi šviesos greičiui vakuume). Teoretikai dalelių gimimą nagrinėja kaip jų išlaisvinimą iš fizikinės tuštumos, arba fizikinio vakuumo. Vakuume dėl jo fliuktuacijų (savotiškų netvarkingų svyravimų) nuolatos gimsta ir vėl išnyksta niekaip nepasireiškiančios — virtualiosios (lot. *virtualis* — galimas, galintis arba turintis pasireikšti tam tikromis sąlygomis) dalelių ir antidalelių poros. Kad virtualiosios poros dalelės virstų realiomis, reikia suteikti joms energiją, lygią $2mc^2$. Žiežirbos trumpaamžės, jos greitai atvėsta ir virsta visai neįdomiais smulkiais medžiagos gabalėliais. Panašiai ir gimusios naujos dalelės. Dauguma jų nestabilios, greitai skyla, virsdamos kitomis elementariosiomis dalelėmis, iš pradžių irgi nestabiliomis, o galų gale stabiliomis — protonais, elektronais, neutrinais.

Kuo greitesnės tos dalelės, kuriomis daužoma, tuo sunkesnių ir įvairesnių naujų dalelių galima gauti. Dauguma pastarojo laiko-

tarpio atradimų padaryta naudojant naujausius labai didelės energijos dalelių greitintuvus. Susiduriant juose įgreitintoms dalelėms, galima gauti naujas daleles, keliasdešimt kartų sunkesnes už protoną.

Pirmosios tokios masyvios dalelės buvo 1977 metais atrastieji supersunkieji mezonai — vadinamieji „ipsilonai" (žymimi graikiška raide Υ). Manoma, kad yra dar daug sunkesnių dalelių. Buvo apskaičiuota, kad anksčiau minėtasis neutralusis tarpinis Z^0 bozonas turėtų būti apie 90 kartų sunkesnis už protoną. Greitintuvai, kuriais naudojantis būtų galima gauti tokias masyvias daleles, dar neseniai buvo tik kuriami. Todėl tokių dalelių buvimo įrodymų ieškota aplinkiniais keliais — numatant mikropasaulio reiškinius, kuriuos jos turėtų sukelti, ir tų reiškinių ieškant. Minėtas neutrino ir elektrono sąveikos atradimas, t. y. užregistruoti elektronų, atšokusių nuo pralėkusių neutrinų, pėdsakai — tokio aplinkinio kelio pavyzdys. Koks tai darbas, galima įsivaizduoti iš eksperimentų trumpo apibūdinimo: su unikalia burbuline kamera, pastatyta prie vieno didžiausių pasaulyje greitintuvų, padarius vieną milijoną tris šimtus tūkstančių nuotraukų, tik trijose buvo rastas laukiamasis atšokusio elektrono pėdsakas.

KVARKŲ HIPOTEZĖ

Visai naujai pradėta vaizduotis mikropasaulį, kai 1964 metais buvo paskelbta kvarkų hipotezė. Kvarkai — negirdėtų neregėtų savybių dalelės vaiduokliai: jų elektros krūviai lygūs $^1/_3$ arba $^2/_3$ elementariojo (elektrono arba protono) elektros krūvio; kvarkų negalima „ištraukti" iš protonų, neutronų ir kitų elementariųjų dalelių vidaus. Jie greitai užvaldė fizikų vaizduotę. Tai lėmė nepaprasta hipotezės sėkmė. Tik iš trijų skirtingų kvarkų ir trijų antikvarkų (kvarkų antidalelių) buvo „sukonstruoti" visi iki tol atrastieji hadronai: kiekvienas mezonas — iš kvarko ir antikvarko, kiekvienas barionas (protonas, neutronas, hiperonas) — iš trijų kvarkų, jų antidalelės antibarionai — iš trijų antikvarkų. Sukonstruotų mezonų ir barionų savybės puikiai atitiko tikrąsias tyrimais nustatytas savybes. Negana to, iš kvarkų buvo sukonstruotos naujos dar nežinomos dalelės. Pradėta jų ieškoti — ir netrukus jos buvo atrastos. Dar daugiau, visus susiduriančių hadronų virsmus (vadinamąsias elementariųjų dalelių reakcijas) buvo nesunku „išversti į kvarkų kalbą" ir toliau nagrinėti kaip paprasčiausią keitimąsi kvarkais ir antikvarkais.

Panašiai, kaip Rentgeno nuotraukoje galima matyti savo vidų, taip peršviečiant protonus ir neutronus labai didelės energijos elektronais galima sužinoti, kas yra jų viduje. Taip šių dalelių vi-

duje buvo atrasti masyvūs taškai, pavadinti partonais (angl. *part* — dalis). Apie juos sprendžiama iš to, kad elektronai, lėkdami protono viduje, kartais nukrypsta nuo pradinės linkmės dideliu kampu, tarsi nuo kažko atšoka. To negalėtų būti, jeigu elektronas protone lėktų per tolygiai pasiskirsčiusią branduolinę medžiagą, lyg kulka per tešlą. Taigi partonai buvo atrasti visai panašiai, kaip E. Rezerfordas 1911 metais atrado masyvų tašką atomo viduje, kurį pavadino atomo branduoliu. Manoma, kad sugalvotieji kvarkai ir stebimieji partonai yra tos pačios dalelės.

Ilgai kėlė nerimą tai, kad gamtoje nepavyko rasti dalelių su trupmeniniais elektros krūviais, nors, stengiantis patvirtinti kvarkų hipotezę, jų ieškota visur ir įvairiausiais būdais. Dabar manoma, kad buvo ieškoma to, ko nė negalėjo būti, nes kvarkai egzistuoja tik hadronų viduje ir jų iš ten negalima nei ištraukti, nei išmušti, nei kitaip išlaisvinti. Taip yra todėl, kad tarp kvarkų veikia ypatingos traukos jėgos, kurios jiems tolstant stiprėja (panašiai, įtempiant spyruoklę, stiprėja jos tamprumo jėga). Vadinasi, kai, susidūrus dviem greitoms dalelėms, kvarkui hadrono viduje suteikiama didelė energija, tai jis tolsta tol, kol įtempimo energija pasidaro lygi $2mc^2$ (čia m — kvarko masė). Tada gimsta nauja kvarko ir antikvarko pora. Jeigu tos energijos būta labai didelės, tai toks kvarko ir antikvarko porų gimimas gali kartotis daug kartų. Tokioje kvarkų ir antikvarkų griūtyje (vykstančioje hadrono viduje!) susidaro jų poros, trejetai ir gimsta nauji mezonai, barionai, antibarionai. Jiems niekas nekliudo neribotai tolti, bet ištraukti kvarką iš šių „naujagimių" vidaus lygiai taip pat neįmanoma. Šį vaizdinį patvirtina stebėjimai: kai susiduria dvi labai didelės energijos elementariosios dalelės (elementariosios tradicine prasme), tai iš susidūrimo vietos išsiveržia priešingų krypčių hadronų srautai, gimę kvarkų ir antikvarkų griūtyje.

Na, o kaip elgiasi kvarkai hadronuose, kai nevyksta tokių „revoliucijų"? Tada jie turi, tariant specialistų žodžiais, „asimptotinę laisvę" — kvarkai hadronų viduje, būdami labai arti, „jaučiasi" beveik laisvi.

GAMTOS JĖGŲ SUVIENIJIMAS

Kvarkų hipotezė „apkaltino" hadronus, kad jie neteisėtai savinasi elementariųjų dalelių titulą, ir juos demaskavo. Senuosius mikropasaulio vaizdinio pamatus iš kitos pusės klibino pagrindinių gamtos jėgų tyrimai, bandymai sukurti jas vienijančias teorijas.

Jau daugiau kaip pusšimtis metų žinoma, kad visos gamtoje veikiančios jėgos bei gamtos reiškiniai yra tik keturių pagrindinių gamtos jėgų — gravitacijos (arba visuotinės traukos), elektromagnetinės, stipriosios ir silpnosios sąveikos jėgų — įvairūs pasireiš-

kimai. Mokslui žinomiems reiškiniams aiškinti visai nereikia dar kitokių jėgų. Iš esmės šiomis žiniomis apie gamtos jėgas remiasi visa praktinė žmonijos veikla, kuriama nauja technika, aiškinamas visas gyvasis ir negyvasis pasaulis. Pirmosios dvi jėgos visiems gerai pažįstamos (Žemės traukos jėga, traukos jėgos tarp Saulės ir planetų ir kt.; jėgos, sukeliančios elektros srovę, valdančios elektronų spindulį televizoriaus ekrane ir kt.). Stiprioji ir silpnoji jėgos veikia tik labai mažu atstumu, todėl ne taip paprasta jas stebėti. Jos pasireiškia mikropasaulyje tarp smulkiausių materijos dalelyčių labai joms suartėjus: stipriosios jėgos — kai atstumas tarp dalelių pasidaro lygus vos vienai milijonajai dešimtmilijonosios centimetro dalies (10^{-13} cm), o silpnosios jėgos — kai jis dar maždaug tūkstantį kartų mažesnis (10^{-16} cm). Dėl stipriųjų jėgų sukibę protonai ir neutronai sudaro atomų branduolius. Sukibimui kintant gali išsilaisvinti daug energijos. Dėl to sprogsta atominė ir termobranduolinė bombos. Dėl silpnųjų jėgų atomų branduoliuose neutronai virsta protonais, o protonai — neutronais (tai beta radioaktyvumo reiškinys, žinomas nuo radioaktyvumo atradimo, bet suprastas kur kas vėliau, tik atradus neutroną). Todėl vieni branduoliai gali virsti kitais, dėl to susidarė daugelis cheminių elementų. Stipriosios ir silpnosios jėgos drauge uždegė žvaigždėse termobranduolinę ugnį. Todėl žvaigždės šviečia, ilgai nevėsta mus šildanti Saulė.

Sena fizikų svajonė — išsiaiškinti, ar šios keturios gamtos jėgos nėra vienos visuotinės gamtos jėgos skirtingi pasireiškimai. Todėl bandoma sukurti jas suvienijančias teorijas.

Tokių teorijų kūrimas — labai sudėtingas darbas. Lygtys, aprašančios atskiras gamtos jėgas (pavyzdžiui, elektromagnetinių jėgų lauką aprašančios garsiosios Maksvelo lygtys) turėtų išplaukti iš bendrosios teorijos lygčių kaip atskiri atvejai. Teorija neturi numatyti nieko nereikalingo. Jeigu iš teorijos išplaukia, kad turėtų būti dar nežinomų reiškinių arba nežinomų dalelių, tai reikia jų ieškoti. Neradus — teoriją atmesti ir imtis darbo iš naujo. Teorijos lygtyse ir jų sprendiniuose turi būti tam tikra simetrija, atitinkanti gamtos reiškinių simetriją.

Visos dabartinės pagrindinių gamtos jėgų teorijos — tai jėgų lauko teorijos, arba trumpiau — lauko teorijos. Jėgų laukas — tai erdvė, kurios kiekviename taške veikia tam tikro didumo ir krypties jėga. Mikropasaulio dalelių sąveikos teorijos vadinamos kvantinėmis lauko teorijomis. Visose tokiose teorijose „veikia" dvėjopos dalelės — medžiagos dalelės ir lauko kvantai. Pastarieji yra savotiškos dalelės tarpininkės, pasiuntiniai, kurie perneša sąveikos jėgas tarp medžiagos dalelių. Medžiagos dalelės sąveikauja besikeisdamos dalelėmis tarpininkėmis, lyg žaistų tinklinį ar krepšinį.

Labai svarbi tokių teorijų išvada — kad jėgų veikimo atstumas priklauso nuo dalelių tarpininkių masės. Šie dydžiai atvirkščiai proporcingi vienas kitam: kuo dalelių tarpininkių masė mažesnė, tuo didesniu atstumu veikia jų pernešamos jėgos. Visai panašiai, kaip svaidant akmenis: kuo akmuo lengvesnis, tuo toliau jį galima nusviesti. Jeigu jėgų veikimo atstumas žinomas, tai dalelių tarpininkių masę galima apytiksliai apskaičiuoti.

Laikoma, kad visuotinės traukos jėgas pernešantis pasiuntinys yra hipotetinė dalelė gravitonas. Visuotinės traukos jėgos veikia net tarp labiausiai nutolusių Visatos objektų — žvaigždžių, galaktikų, galaktikų telkinių, taigi neribotai dideliu atstumu. Todėl gravitono rimties masė turėtų būti lygi nuliui. Elektromagnetinių jėgų pernešėjas yra šviesos dalelė fotonas. Jo rimties masė lygi nuliui, dėl to elektromagnetinės jėgos veikia irgi neribotu atstumu — mes galime palaikyti radijo ryšį su kosminiais laivais, nusiųstais į kitas planetas, registruoti fotonus, pasiekiančius Žemę iš tolimiausių Visatos sričių.

Stipriųjų jėgų veikimo atstumas mažas, todėl dalelės tarpininkės masė nelygi nuliui. Silpnųjų jėgų veikimo atstumas dar apie tūkstantį kartų mažesnis, tiek pat kartų didesnė turėtų būti šias jėgas pernešančių dalelių tarpininkių masė (pirmajame skyrelyje minėta milžiniška tarpinės Z^0 dalelės masė buvo apskaičiuota panašiu būdu).

Bandymai sukurti gamtos jėgas vienijančias teorijas ilgai buvo nesėkmingi. Būta laikotarpių, kai net atrodydavo, jog tai beviltiška. Kokia prasmė ieškoti bendrumo, kurio gal nė nėra? Atsakymą davė praėjęs dvidešimtmetis. Sukurta bendra elektromagnetinių ir silpnųjų jėgų teorija (vadinamoji elektrosilpnosios sąveikos teorija). Nėra tokių reiškinių, kurie prieštarautų šios teorijos išvadoms. Teorija numatė nežinomas elementariųjų dalelių sąveikas, kurios vėliau buvo atrastos (viena jų — pirmajame skyrelyje minėtos neutraliosios silpnosios srovės). Iki dar bendresnės teorijos, vienijančios elektromagnetines, silpnąsias ir stipriąsias jėgas, atrodo, beliko vos keli žingsniai.

Kas gali būti bendra tarp elektromagnetinių ir silpnųjų jėgų, jei vienų veikimo atstumas yra begalinis, o kitų — nepaprastai mažas? Nors jėgas pernešančios dalelės tarpininkės skiriasi, bet jėgų kilmė abiem atvejais yra ta pati — panašiai, kaip kad mėtydami sviedinuką ir perduodami sunkų daiktą naudojame tos pačios prigimties raumenų jėgas.

Elektrosilpnųjų jėgų lauke tokie „sviedinukai" — lauko kvantai — net keturi. Tai dvi elektringos dalelės — vadinamieji tarpiniai bozonai W^+ ir W^-, ir dvi neutralios dalelės — tarpiniai bozonai W^0 ir B^0. Bet ne viskas čia paprasta: jeigu elektringieji elek-

trosilpnųjų jėgų lauko kvantai yra normalios jėgas pernešančios tarpinės dalelės, tai to negalima pasakyti apie neutraliuosius kvantus. Jie elgiasi labai keistai: jėgas perneša ne jie patys, o tam tikros jų kombinacijos. Tiktai tos kombinacijos elgiasi kaip normalios dalelės tarpininkės, tik jos gali būti stebimos. Viena jų — senas pažįstamas fotonas. Kita — neutrali masyvi dalelė, jau ne kartą minėtas tarpinis Z^0 bozonas. Trys masyvios dalelės — W^+, W^- ir Z^0 bozonai (W^+ ir W^- dalelės ne ką lengvesnės už Z^0 bozoną) — perneša jėgas, kurios pasireiškia kaip silpnosios jėgos. Kai dėl silpnųjų jėgų „silpnumo", tai jos silpnos tik žiūrint iš toli. 10^{-16} cm atstumuose jos panašaus stiprumo, kaip ir elektromagnetinės jėgos. Tai patvirtina eksperimentai.

W^+, W^- ir Z^0 dalelės buvo atrastos 1983 metais. Jos gimė Europos branduolinių tyrimų centre (CERN'e) Šveicarijoje, susidūrus iki 270 GeV įgreitintiems protonams ir antiprotonams (1 GeV maždaug lygus energijai, sutelktai vieno protono rimties masėje). Šis atradimas, vienas didžiausių XX amžiaus fizikoje, yra galutinis elektromagnetinių ir silpnųjų jėgų vieningumo, elektrosilpnųjų jėgų lauko, patvirtinimas.

AR MIKROPASAULIO DALELĖS VISADA BUVO TOKIOS PAT?

Iki elektrosilpnųjų jėgų lauko teorijos sukūrimo ir pripažinimo vedė ilgas ir klaidus kelias. Tai, kad tokiame jėgų lauke turi būti keturios jėgas pernešančios dalelės, buvo įrodyta dar 1961 metais. Bet. . . visų tų dalelių rimties masės turėjo būti lygios nuliui. Tik tada teorijos lygtys ir jų sprendiniai tenkino kai kuriuos labai bendrus simetrijos reikalavimus. Bet tai prieštaravo žinomam faktui — mažam silpnųjų jėgų veikimo atstumui. Teorija atsidūrė aklavietėje. Kur ieškoti išeities?

Atsakymą davė savaiminio simetrijos išnykimo idėja. Kitose fizikos srityse tokio simetrijos išnykimo pavyzdžių — kiek tik nori. Įsivaizduokime dujas. Jų savybės visomis kryptimis vienodos, taigi visiška simetrija. Tegu dujos vėsta. Tam tikroje temperatūroje jos sukietėja ir virsta kristalais, kurių savybės įvairiomis kryptimis nevienodos. Panašiai atsitinka ir su užšąlančiu vandeniu: skysto vandens savybės visomis kryptimis vienodos, o ledas jau susideda iš kristalų, kurių simetriškumas visai kitoks. Tokie reiškiniai vadinami faziniais virsmais (medžiaga iš dujinės arba skystos būsenos pereina į kietą būseną). Vykstant faziniam virsmui simetriškumas savaime kinta, savaime atsiranda arba savaime išnyksta.

Ar negalėjo panašiai atsitikti mikropasaulyje? Iš stebėjimų, kuriais remiasi dabartinė kosmogonija (mokslas apie Visatos kilmę), daroma išvada, kad labai tolimoje praeityje Visata buvusi ne-

paprastai tanki ir neįsivaizduojamai karšta. Tokioje pirmykštėje medžiagoje mikropasaulio dalelės buvo taip arti viena kitos, kad tiesiog „stumdėsi alkūnėmis", gal net buvo prasiskverbusios viena į kitą. Kodėl būtinai turime manyti, kad, temperatūrai ir tankiui kintant plačiausiose ribose, mikropasaulio dalelių savybės turėjo išlikti tokios pat? Gal nulinė keturių elektrosilpnąsias jėgas pernešančių dalelių masė yra tik teorijos sprendinys tam tikroms sąlygoms, kai materija labai tanki ir karšta? Ar negalėjo, pirmykštei materijai vėstant ir plečiantis, įvykti fazinis virsmas, dėl kurio kai kurie elektrosilpnųjų jėgų pernešėjai įgijo masę ir dėl to jų savybių simetriškumas išnyko?

Teorija, aiškinanti, kaip tai galėjo atsitikti, buvo sukurta įvedus dar keturias nepaprastai masyvias hipotetines daleles — vadinamuosius Higso bozonus (pavadinti teorijos autoriaus vardu). Trys bemasės dalelės tarpininkės pirmykštėje medžiagoje tam tikru momentu paprasčiausiai „prarijo" tris Higso bozonus ir taip įgijo masę. Ketvirtoji Higso dalelė turėtų būti išlikusi iki mūsų laikų.

KAIP DABAR ĮSIVAIZDUOJAMAS MIKROPASAULIS

Teisę vadintis elementariosiomis dalelėmis išsaugojo visi leptonai — dalelės, sąveikaujančios silpnosiomis, bet negalinčios sąveikauti stipriosiomis jėgomis. Tai elektronas, miuonas, elektroninis ir miuoninis neutrinai (aišku, ir visos jų antidalelės). Prisidėjo du nauji leptonai: 1975 metais atrastas supersunkusis elektronas, arba „tau leptonas" (beveik dvigubai masyvesnis už protoną; jo masė lygi 3300 elektronų masei) ir jo neutrinas (tau neutrinas). Taigi, leptonų dabar iš viso šeši.

Visų hadronų vietą užėmė kvarkai. Tačiau jų jau ne trys, kaip kad buvo kvarkų hipotezei tik gimus.

Trijų kvarkų hipotezė, puikiai aiškinusi hadronų savybes, turėjo trūkumų. Visiems hadronams būdinga ne tik stiprioji, bet ir silpnoji sąveika. Tuo tarpu elementariųjų dalelių, kurioms būdinga silpnoji sąveika,— leptonų — tuo metu buvo žinoma ketvertas, o elementariųjų objektų, tarp kurių veikia tiek stipriosios, tiek ir silpnosios jėgos — kvarkų — buvo tik trys. Vos gimus trijų kvarkų hipotezei, buvo pareikšta dar viena hipotezė — kad turėtų būti dar vienas kvarkas. Jis turėjo skirtis nuo pirmųjų trijų nauja savybe, kuri buvo sąlyginai pavadinta žavumu. Pats kvarkas buvo pavadintas žaviuoju.

Jei yra žavusis kvarkas, tai turi būti ir žavieji hadronai, į kurių sudėtį jis įeina. Tačiau jokių dalelių, pretenduojančių vadintis žaviosiomis, 1964 metais dar nežinota. Gal žaviosios dalelės — tai realybės neatitinkanti teoretikų išmonė?

Atsakymo teko laukti 10 metų. Ir štai 1974 metais elementariųjų dalelių fizikoje sensacija — žaviosios dalelės tikrai yra! Tai J/ψ (psi) mezonas. Apie jo atradimą iš karto paskelbia dvi fizikų grupės (viena jį pavadino J mezonu, kita — ψ mezonu). J/ψ mezono masė net 3,3 karto didesnė už protono masę. Kad tai žavioji dalelė, rodė jos gyvavimo trukmė — net ...10^{-20} sekundės (viena dešimtmilijardoji dešimtmilijardosios sekundės dalies). Tačiau naujajai dalelei būtų lemta gyvuoti tūkstantį kartų trumpiau, jeigu ji neturėtų naujos savybės — žavumo. Per keletą metų buvo atrasti visi teoretikų sukonstruotieji žavieji mezonai ir daugelis žaviųjų barionų.

1977 metais buvo atrasta dalelė, daugiau kaip 10 kartų sunkesnė už protoną, o po to dar kelios panašios dalelės. Dalelių elgsena rodė, kad jos — mezonai. Šių supersunkiųjų mezonų, pavadintų „ipsilonais", keturių kvarkų hipotezė nenumatė. Teko hipotezę papildyti penktuoju kvarku. Jis buvo pavadintas gražiuoju.

Kadangi kvarkų turėtų būti tiek pat, kiek leptonų, tai manoma, kad greičiausiai yra šeši kvarkai.

Deja, tai dar ne viskas. Kiekvienas kvarkas gali būti trijose būsenose. Jos sąlyginai vadinamos papildomų spalvų (raudonos, žalios ir mėlynos) pavadinimais. Todėl sakoma, kad kvarkai būna raudoni, žali ir mėlyni (antikvarkai — antiraudoni, antižali ir antimėlyni). Kadangi skirtingų spalvų kvarkai skiriasi, tai gali atrodyti, kad yra net 18 skirtingų kvarkų.

Leptonai ir kvarkai — vienintelės pagrindinės medžiagos dalelės. O dalelės tarpininkės, kurios perneša jų sąveikos jėgas? Kiek jų yra?

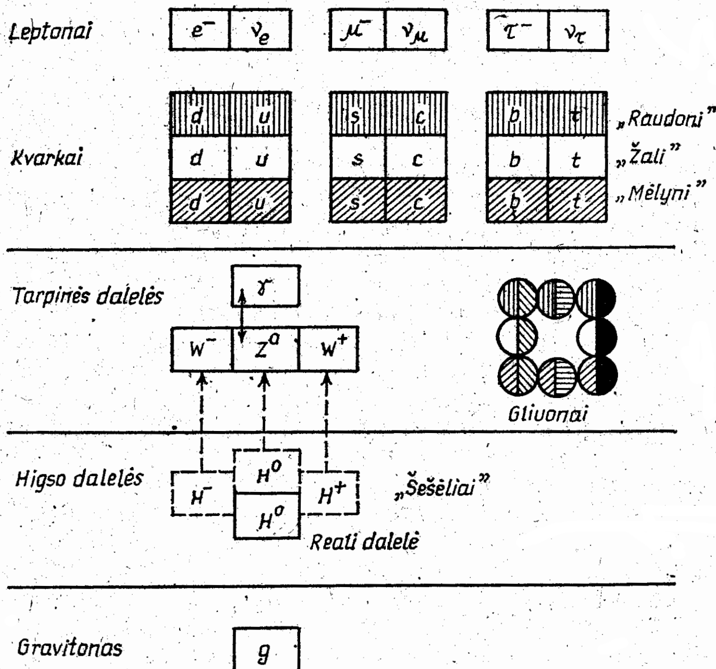
Tai jau minėtos keturios dalelės, pernešančios elektrosilpnąsias jėgas: fotonas ir W^+, W^- ir Z^0 tarpiniai bozonai. Dar gravitonas. Pagaliau, dar grupė tarpinių dalelių, pernešančių stipriąsias jėgas tarp kvarkų. Tai gliuonai (pavadinimas iš angl. *glue* — klijai, t. y. tai, kas „suklijuoja" iš kvarkų hadronus). Jie, kaip ir kvarkai, būna tik hadronų viduje.

Gliuonai — hipotetinės dalelės, bet jau yra netiesioginių jų buvimo įrodymų. 1979 metais tiriant labai didelės energijos elektronų ir pozitronų (elektronų antidalelių) „išmedžiagėjimą" jiems susiduriant, buvo stebėti reiškiniai, kuriuos, manoma, galėjo sukelti tiktai gliuonai.

Gliuono, kaip ir fotono, rimties masė lygi nuliui. Kvarkas vienu metu gali būti tik „vienos spalvos", o gliuonas turi ir spalvą, ir antispalvą. Spalva — tai kažkas panašaus į elektros krūvį, lyg ir sąveikos jėgų šaltinis. Todėl kalbama apie spalvinę kvarkų sąveiką. Sąveikaujantiems kvarkams keičiantis gliuonais, kinta jų spalva. Kvarkų sąveikas tyrinėjantis naujas mokslas vadinamas kvantine

chromodinamika (graik. *chromos* — spalva). Manoma, kad iš viso yra 8 skirtingi gliuonai.

Ypatingą vietą naujojoje pagrindinių gamtos dalelių sistemoje užima ankstesniame skyrelyje minėtosios Higso dalelės. Trijų Higso dalelių, kurias kažkada „prarijo" elektrosilpnąsias jėgas pernešančios dalelės, dabar yra likę tik „šešėliai". Jos — vaiduokliai. Tačiau ketvirtoji, likusioji, turėtų būti.



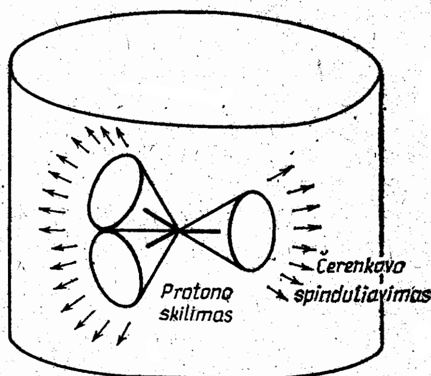
1 pav.

Visos pagrindinės mikropasaulio dalelės parodytos 1 paveiksle. Matyti darni sistema. Tačiau čia daug hipotetinių, „sugalvotų" dalelių. Yra tik netiesioginių jų buvimų eksperimentiniai įrodymai. Kai kurios dalelės dar ilgai liks hipotetinėmis, kitos greitai turėtų būti pripažintos realiomis. Jau gauti laisvi W^+, W^- ir Z^0 tarpiniai bozonai. Du galingiausi pasaulio greitintuvai — Europos branduolinių tyrimų centro ir Fermio greitintuvų laboratorijos — greitai turėtų tapti W^+, W^- ir Z^0 dalelių „fabrikais". Fermio laboratorijos greitintuvo, kurio pritaikymas tokiems eksperimentams turėtų būti užbaigtas 1985 m., žiedinėje kameroje priešpriešiais skriejančių protonų ir antiprotonų energija pasieks 1000 GeV.

AR STABILUS PROTONAS?

Dar neseniai apie protono nestabilumą niekas negalvojo. Juk tai pagrindinė medžiagos dalelė! Šiandien pasaulyje jau veikia apie 10 sudėtingiausių įrenginių, giliose šachtose paslėptų nuo kosminių spindulių, sukurtų vieninteliu tikslu — pastebėti protono skilimą. Tūkstančių tonų talpos rezervuarus, pripildytus nepaprastai švaraus vandens ar kito skysčio, švytinčio, kai jame juda didelės energijos dalelė, stebi keli tūkstančiai fotoelektroninių daugintuvų (prietaisų silpniems šviesos signalams registruoti). Jie laukia, kada gi pasirodys taip geidžiamas šviesos signalas, liudijantis, kad padarytas „amžiaus atradimas".

Aišku, ir šiandien niekas neabejoja tuo, kad protonas — tai palyginti labai stabili dalelė. Jos vidutinis amžius ne mažiau kaip 100 milijardų milijardų (10^{20}) kartų ilgesnis už Visatos amžių (Visatos amžius — apie 15 milijardų metų). Tačiau iš teorijos, bandančios suvienyti stipriąsias, silpnąsias ir elektromagnetines jėgas, išplaukia, kad protonas vis dėlto nestabilus. Numatoma, kad jo vidutinis amžius turėtų būti maždaug 10^{32} metų. Tai tik 100 kartų daugiau, negu dabar žinoma protono stabilumo riba (10^{30} metų).



2 pav.

Teorija papildyta dar vienos rūšies hipotetinėmis dalelėmis, vadinamomis X dalelėmis. Jos susideda iš dviejų kvarkų. Jų masė net šimtą tūkstančių milijardų (10^{14}) kartų didesnė už protono masę, tad jas sukurti naudojant greitintuvuose įgreitintas daleles neįmanoma. Tačiau tokiai dalelei padedant (kai ji protono viduje susidaro virtualiai) protonas gali virsti neutraliu π^0 (pi) mezonu ir pozitronu. Pi mezonas tuojau virsta dviem labai didelės energijos fotonais, kurie pagimdo du srautus greitų elektringų dalelių. Elektringosios dalelės, lekiančios medžiagoje greičiau negu sklinda toje medžiagoje šviesa, spinduliuoja vadinamojo Čerenkovo spinduliavimo fotonus. Protono virtimą pozitronu tikimasi užregistruoti pagal tris Čerenkovo spinduliavimo šviesos kūgius (2 pav.). Jeigu prietaisais, stebinčiais rezervuarą, kuriame yra 10^{32} ar 10^{33} protonų, per metus bus užregistruotas bent vienas toks įvykis, tai bus patvirtinta, kad trijų gamtos jėgų suvienijimas įvyko.

A. MATULIS

SINERGETIKA, ARBA MOKSLAS APIE STRUKTŪRŲ SUSIDARYMĄ

Mes gyvename pasaulyje, kuriame laikas bėga tik pirmyn. Visur aplinkui stebime negrįžtamus procesus. Rašalo lašas, įlašintas į kibirą vandens, tolydžiai pasklinda, nudažydamas vandenį blyškia spalva. Atvirkščias procesas nevyksta. Karšta žiežirba atvėsta, jos šiluma išsisklaido aplinkoje. Atvirkščias procesas niekada nestebimas. Taigi dažniausiai mes matome, kaip bet kokia sistema keičiasi artėdama prie vienintelės galutinės būsenos, paprastai vadinamos šilumine (arba termodinamine) pusiausvyra. Tokius procesus nagrinėja termodinamika. Pagrindinis šio mokslo dėsnis — antrasis termodinamikos principas — teigia, kad bet kokia sistema savaime keičiasi artėdama prie termodinaminės pusiausvyros, kuriai būdingas visiškas išsilyginimas, visur vienodas chaotiškas šiluminis judėjimas.

Imkime dar vieną pavyzdį. Išjungus variklį, automobilis po kiek laiko sustoja. Energija, kuri ką tik buvo sukoncentruota vieningame viso automobilio judėjime, pavirsta šilumine (dėl trinties sušyla ratai, kelias), t. y. automobilio molekulių chaotiško judėjimo energija. Ir tai yra visuotinis chaoso didėjimo dėsnis. Tačiau pavyzdys su automobiliu rodo ir kitą reiškinį: juk, kai variklis veikia, automobilis važiuoja. Tuomet šiluminė (chaotiško judėjimo!) cilindre degančio benzino energija virsta taisyklingo ir labai paprasto viso automobilio judėjimo energija. Vadinasi, žmogus moka pasigaminti „žaisliukus", kuriems iš pirmo žvilgsnio, regis, negalioja antrasis termodinamikos dėsnis. Žmogus ir pats kartu su visa gyvąja gamta elgiasi taip, tarytum prieštarautų tam dėsniui. Pagrindinė gyvosios gamtos savybė yra struktūrų — tvarkingos, organizuotos materijos — sudarymas. Gyvoji gamta nevienalytė: ji susideda iš ląstelių, šakų, kaulų, rankų ir t. t. Pagaliau Č. Darvino nustatytoji gyvosios gamtos evoliucija yra iš esmės struktūrų susidarymo ir tobulėjimo dėsnis. Dėl tokio akivaizdaus skirtumo tarp negyvosios gamtos, kur visos struktūros anksčiau ar vėliau suyra, ir gyvosios gamtos, kuri pati kuria sudėtingas struktūras ir jas palaiko, dauguma mokslininkų ilgai laikėsi nuomonės, kad tiksliųjų mokslų — fizikos, chemijos, matematikos — metodai vargu ar gali būti sėkmingai taikomi reiškiniams gyvojoje gamtoje tirti.

Per paskutiniuosius dešimt dvidešimt metų tas požiūris iš esmės pasikeitė. Ir tai įvyko dėl to, kad buvo atrasta ne taip mažai labai paprastų negyvų sistemų, kurios tam tikromis sąlygomis sukuria gražias, taisyklingas erdvines struktūras arba demonstruoja taisyklingą periodišką elgesį.

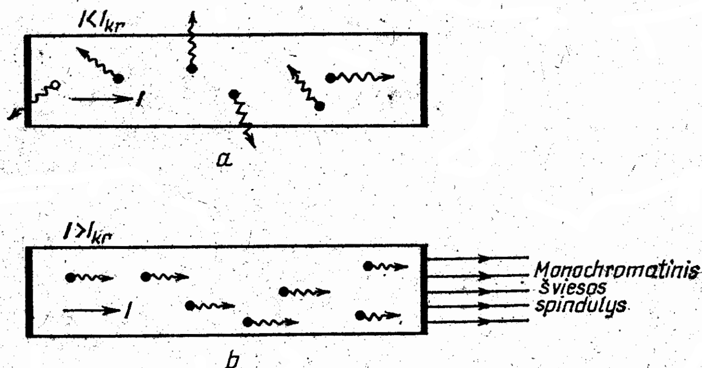
Vienas iš tokių pavyzdžių yra 1950 m. B. Belousovo atrasta periodinė cheminė reakcija. Iki tol žinomos cheminės reakcijos paprastai tolygiai artėdavo prie galutinės stabilios termodinaminės pusiausvyros. (Prisiminkime pavyzdį su lašu rašalo.) O štai B. Belousovas, įpylęs į stiklinę citrinos rūgšties, cerio sulfato, kalio bromato, sieros rūgšties ir šiek tiek vandens, gavo sistemą, kuri prie termodinaminės pusiausvyros artėjo labai nenoriai. Tirpalo spalva pradėjo periodiškai (maždaug kas pusantros minutės) keistis iš bespalvės į geltoną ir atvirkščiai. Toks spalvos kaitaliojimasis — osciliacijos — tęsėsi daugiau nei valandą. Cheminis laikrodis! Ši reakcija buvo tokia nelaukta ir atrodė tokia prieštaraujanti seniai nusistovėjusiam požiūriui, kad mokslininkai nepatikėjo atradėju. Belousovo straipsnio nesutiko publikuoti chemikų žurnalai. Ir tik po keliolikos metų ši reakcija tapo pripažinta. Dabar Belousovo reakcija jau plačiai žinoma ir yra klasikinis laikinų struktūrų susidarymo, vykstant cheminėms reakcijoms, pavyzdys. Tokiomis reakcijomis dabar plačiai domimasi. Atliekant panašias reakcijas, ploname tirpalo sluoksnyje pavyko gauti įspūdingus spalvotus ornamentus, kaip parodyta 1 pav. Tai stabilios erdvinės struktūros. Vykstant tokioms cheminėms reakcijoms, kiekviena molekulė juda ne visiškai chaotiškai, kaip termodinaminės pusiausvyros atveju, o suderintai su kitų molekulių judėjimu. Tokį judėjimą priimta laikyti koreliuotu. Visos molekulės veikia išvien, kolektyviai, todėl susidaro makroskopinės erdvinės arba laikinės struktūros.



1 pav.

Kitas labai gražus kolektyvinio molekulių arba atomų veikimo pavyzdys yra lazeris. Jis plačiau aprašytas ankstesniame straipsnyje (žr. 57 psl.). Imkime dujinį lazerį — dujų pripildytą cilindrą, kurio galai uždengti veidrodėliais, kurių vienas yra pusiau skaidrus

(2 pav.). Cilindre esančios dujos sužadinamos, sakykim, praleidus jomis elektros srovę. Tai vadinama kaupinimu. Dujos kaista, jų molekulės spinduliuoja elektromagnetines bangas. Kol kaupinimas mažas, chaotiškai judančios molekulės šviesą spinduliuoja taip pat chaotiškai (2 pav., *a*). Dujos tolygiai švyti, panašiai kaip reklaminiai neoniniai vamzdeliai, dienos šviesos lempos. Tačiau kai kaupinimas padidinamas ir viršija tam tikrą krizinį (2 pav., *b*), molekulės pradeda veikti kolektyviai, jų judėjimas sukoreliuojamas, ir jos pradeda darniai spinduliuoti vieno dažnio ir vienos krypties galingą spindulį.



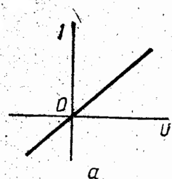
2 pav.

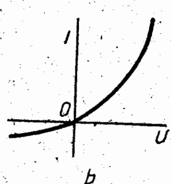
Minėtuose pavyzdžiuose (ir cheminėse reakcijose, ir lazeryje) sistema stengiasi ne didinti chaosą, o mažinti. Tačiau tai visai neprieštarauja antrajam termodinamikos dėsniui: tos sistemos nėra izoliuotos, joms labai toli iki termodinaminės pusiausvyros, jomis teka energijos srautai. Sistemoje, kurioje vyksta cheminė reakcija, tai — cheminės energijos, iš pradžių sukauptos reagentuose, srautas, o lazeryje — kaupinimo energijos (minėtame pavyzdyje elektros srovės) srautas. Kai energijos srautai nutrūksta (pavyzdžiui, kai pasibaigia cheminiuose reagentuose sukaupta energija arba išjungiama elektros srovė lazeryje), kolektyvinis molekulių veikimas baigiasi, struktūros suyra, sistema evoliucionuoja artėdama prie termodinaminės pusiausvyros, prie visiško chaoso, sistema tarsi miršta.

Dabar, kai žinome, kad esama sistemų, kuriose chaosas ne didėja, o mažėja, kuriose organizuojasi struktūros, galime jų pastebėti labai daug — reikia tik apsidairyti aplink. Štai kad ir toks atvejis. Virš vandens pučia vėjas. Kol jis silpnas, vandens paviršius ramus. Oro masė trinasi į vandenį, vandens paviršius, taip

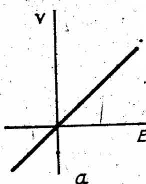
p‹ † ir oras, šyla,— vėjo energija virsta chaotiško vandens ir oro molekulių judėjimo energija. Tačiau kai vėjo greitis didesnis už tam tikrą vertę, atsiranda makroskopinės struktūros (bangos), kuriose susikoncentruoja gana didelė vėjo energijos dalis.

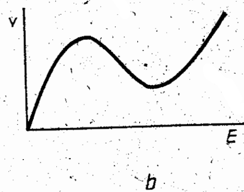
Atrodo, kad makroskopinių struktūrų atsiradimas sistemose, kuriomis teka dideli energijos srautai, yra veikiau taisyklė nei išimtis. Tai labai bendras reiškinys, stebimas įvairiose sistemose: fizikinėse, cheminėse, biologinėse ir kt. Todėl natūralu, kad atsirado nauja mokslo šaka, tirianti šiuos reiškinius,— sinergetika. Pavadinimą sugalvojo Štutgarto universiteto profesorius H. Hakenas.





3 pav.





4 pav.

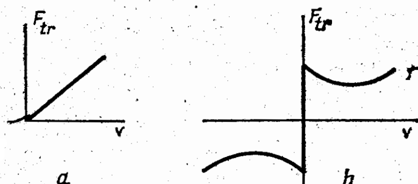
„Synergeia" yra graikų kalbos žodis, reiškiantis kolektyvinį, kooperatinį veiksmą. Sinergetika — nauja mokslo šaka, atsiradusi kelių mokslų, pradedant fizika ir baigiant biologija, sandūroje; paskutiniuoju metu ji intensyviai plėtojama.

Sinergetikai, kaip naujai mokslo šakai, būdinga ne tik tai, kad ji tiria bendrus struktūrų susidarymo dėsningumus, bet ir tai, kad jiems taiko vieningus matematinius metodus. Įvairių mokslo šakų reiškiniai aprašomi matematinėmis lygtimis. Radę tų lygčių sprendinius, mokslininkai prognozuoja įvairių sistemų savybes. Beje, kai sistemos labai paprastos, pakanka algebrinių lygčių, o kai jos sudėtingos, tenka naudoti diferencialines, integralines lygtis, net sudėtingas jų sistemas. Sinergetikoje taip pat naudojamos matematinės lygtys. Nors įvairūs jos reiškiniai aprašomi labai skirtingomis lygtimis, bet visoms joms būdingas bendras bruožas — netiesiškumas: jos aprašo netiesinį ryšį tarp poveikio ir sistemos arba jos dalies reakcijos į tą poveikį. Paaiškinsime tai pavyzdžiais. Radiotechnikos elementui, kuris vadinamas rezistoriumi, tinka Omo dėsnis:

$$I = \frac{U}{R}; \tag{1}$$

čia U — įtampa (išorinis poveikis), I — srovė (reakcija), R — pastovus koeficientas — rezistoriaus varža. Grafiškai šis dėsnis pavaizduotas 3 pav., *a*, vadinamąja voltamperine charakteristika, kuri šiuo atveju yra tiesė. Todėl (1) sąryšis (tiesioginis proporcingu-

mas) vadinamas tiesiniu, o rezistorius — tiesiniu radiotechnikos elementu. Ryšys tarp įtampos ir srovės gali būti ir kitoks. 3 pav., *b*, pavaizduota puslaidininkinio diodo voltamperinė charakteristika. Tai netiesinio elemento pavyzdys. 4 pav. pavaizduotas ryšys tarp krūvininko greičio *v* puslaidininkyje ir jį veikiančio elektrinio lauko *E*, t. y. mikroskopinis voltamperinės charakteristikos analogas. Kol elektrinis laukas yra silpnas (4 pav., *a*), stebime tiesinį *v* ir *E* ryšį. Tai Omo dėsnio galiojimo sritis. Kai elektrinis laukas yra stiprus, *v* ir *E* ryšys tampa netiesiniu: 4 pav., *b*, matome netiesinę elektroninio puslaidininkio GaAs charakteristiką, kai elektrinis laukas yra keleto kilovoltų centimetrui stiprumo. Dar vienas netiesinio ryšio pavyzdys — trinties jėgos priklausomybė nuo kūno judėjimo greičio — pavaizduota 5 pav. 5 pav., *a*, pavaizduotas „klampiosios" trinties atvejis, kai



5 pav.

$$F_{tr} = k \cdot v. \qquad (2)$$

Tai tiesinio ryšio atvejis. 5 pav., *b*, pavaizduota netiesinė „sausoji" trintis. Ji turi tą įdomią savybę, kad, esant mažam judėjimo greičiui, trinties jėga tuo didesnė, kuo lėčiau kūnas juda.

Taigi sinergetiniai reiškiniai atsiranda tik netiesinėse sistemose, jie aprašomi netiesinėmis matematinėmis lygtimis; jose yra narių, kurių grafikai analogiški pavaizduotiems 3 pav., *b*, 4 pav., *b*, 5 pav., *b*. Sistemoje, kur visi ryšiai tarp elementų tiesiniai (panašiai kaip pavaizduota 3 pav., *a*, 4 pav., *a*, 5 pav., *a*), tokių reiškinių nebus. Iš tikrųjų, radiotechninis lazerio analogas yra srovės virpesių generatorius, o jo neįmanoma sukonstruoti tik iš rezistorių, kondensatorių ir induktyvumo ričių — tiesinių elementų. Generatoriui sukonstruoti būtinas koks nors netiesinis elementas: diodas, triodas arba neoninė lemputė.

Netiesinė GaAs voltamperinė charakteristika (4 pav., *b*) taip pat įdomi sinergetikos požiūriu. Iš tikrųjų, įjungus GaAs bandinį į srovės grandinę, stebimas įdomus reiškinys. Kol elektrinis laukas silpnas, bandinys elgiasi kaip paprasta varža: išsiskiria Džaulio šiluma, t. y. elektros srovės energija virsta bandinio krūvininkų chaotiško judėjimo energija. Tačiau kai elektrinio lauko stiprumas viršija krizinę vertę, visi krūvininkai ima veikti išvien, sudarydami periodiškai bėgančias išilgai bandinio elektrines bangas. Tai vadinamasis Gano generatorius.

Sinergetiniai reiškiniai, susiję su netiesine „sausąja" trintimi (5 pav., *b*), irgi plačiai paplitę: pavyzdžiui, besitrinančių judančių

mechanizmų dalių žviegimas ir vibracijos. Čia kinetinė energija pereina ne į šiluminę, o į makroskopinio judėjimo — vibracijos arba garso — energiją. Tai irgi kolektyvinis reiškinys, tik labai nemalonus ir žalingas.

Iš pateiktųjų pavyzdžių matome, kaip plačiai paplitę sinergetiniai reiškiniai netiesinėse techninėse, fizikinėse ir cheminėse sistemose. Nuostabu, kad, savaime susidarant struktūroms, labai skirtingose sistemose stebimos įspūdingos analogijos. Vadinasi, tokiose sistemose vykstantys procesai paklūsta tiems patiems fundamentaliems principams. Ieškoti tų principų, analogijų, juos taikyti konkrečių sistemų tyrimui — tai svarbiausi sinergetikos mokslo tikslai. Tačiau sinergetika būtų gana skurdi, jeigu tiriamųjų sistemų ir jų elgsenos analogijų „dairytųsi" vien negyvojoje gamtoje. Kaip jau buvo minėta straipsnio pradžioje, struktūrų susidarymas ir jų išsilaikymas yra viena iš svarbiausių gyvosios gamtos savybių. O vienas iš didžiausių sinergetikos nuopelnų — tai analogijų tarp struktūrų susidarymo gyvojoje ir negyvojoje gamtoje išaiškinimas.

Gyvojoje gamtoje matome ištisą struktūrų hierarchiją. Tai ir struktūros ląstelėje, ir ląstelių diferencijacija, ir skirtingi organai, ir, pagaliau, atskiri organizmai. Visos tos labai sudėtingos ir labai savitos struktūros susidaro labai skirtingomis sąlygomis, esant įvairiausioms sąveikoms. Todėl jas ir tiria visai skirtingos mokslo šakos, pavyzdžiui, citologija — ląstelių sandarą, fiziologija — organizmų gyvybinę veiklą ir t. t. Tačiau visų tų struktūrų atsiradimui būdingas bendras bruožas — tam tikra kooperatinė veikla: molekulių judėjimo koreliacija, susidarant ląstelių struktūriniams elementams, nervų aktyvumo koreliacija, susidarant smegenų α ritmams ir t. t. Todėl atrodo, kad sinergetikos idėjos ir metodai ateityje vis plačiau bus taikomi gyvosios gamtos reiškiniams tirti. Sinergetika čia gali pasiūlyti gerus matematinius modelius sudėtingų sistemų elgsenai kokybiškai aprašyti. Iš dabar sparčiai besiplečiančių šia linkme tyrimų galima paminėti bent žymiausius: biologinių struktūrų susidarymo matematinių modelių sudarymas ir tyrimas, evoliucijos procesų modeliavimas, signalų plitimo nervais tyrimas, mechaninio ląstelių aktyvumo modeliavimas, širdies aritmijų modeliavimas, smegenų ritmo analizė ir kt.

Kolektyvinio veikimo pavyzdžių aptinkame ir aukštesnėse gyvosios gamtos išsivystymo pakopose. Štai imkime ne atskirą organą ar organizmą, o kokių nors organizmų visumą — populiaciją. Populiacijų elgseną tiria ekologija. Aišku, kad kiekvienas populiacijos narys negali būti visai nepriklausomas — jis daugiau ar mažiau priklauso ir nuo kaimyninių tos pačios populiacijos narių, ir nuo kitų greta esančių populiacijų. Pavyzdžiui, kiekvieno kiškio

gyvenimas priklauso nuo kitų kiškių, mintančių tais pačiais augalais, ir nuo plėšrūnų ir žmonių, kurie juos naikina. Ši iš pirmo žvilgsnio atrodanti nedidelė kiekvieno individo elgsenos koreliacija dažnai lemia didelių mastų reiškinius. Klasikinis ekologinis pavyzdys yra „plėšrūno" ir „aukos" dinamika. Sakykime, tiriamos dvi rūšys — vilkai ir kiškiai, tarp kurių yra labai paprasti santykiai: kiškiai minta žole, o vilkai medžioja kiškius. Regis, viskas aišku. Tačiau pasirodo, kad didesniu mastu tokia sistema nestabili. Iš tikrųjų, kai žolės užtenka, kiškiai sparčiai dauginasi, jų pagausėja. Pagerėja gyvenimas vilkams, jų prisiveisia daugiau. Tačiau daug vilkų išnaikina didelę dalį kiškių, jiems pradeda stigti maisto ir jų sumažėja. O tada vėl mažiau jie išnaikina kiškių, šių vėl ima sparčiai daugėti ir t. t. Taigi kiškių ir vilkų tankis periodiškai svyruoja, ir antrieji svyravimai „vėluoja" pirmųjų atžvilgiu. Šis supaprastintas pavyzdys rodo, kaip organizuojasi ekologinė laikinė struktūra (ekologinis laikrodis). O dėl to, kad kiškiai ir vilkai maitinasi skirtingo ploto teritorijose, gali susidaryti ir erdvinė struktūra: teritorija gali suskilti į atskirus rajonus su kiškių ir vilkų pertekliumi. Kiti aktualūs ekologinių struktūrų susidarymo pavyzdžiai yra globalinės gyvių migracijos, epidemijų bangos ir kt.

Žmogaus elgesys irgi labai kolektyvinis. Kasdien dirbame kolektyve, mūsų mąstymą nuolat veikia kitų žmonių idėjos, sužinotos iš pokalbių, knygų ir t. t. Tad natūralu, kad visuomeninio gyvenimo reiškiniuose, kuriuos tiria ekonomika, sociologija ir kiti visuomeniniai mokslai, galima rasti daug sinergetinių reiškinių, analogiškų stebimiems kur kas paprastesnėse sistemose. Todėl ir čia yra plati dirva sinergetikos principams ir analogijoms taikyti. Tokie moksliniai tyrimai pastaruoju metu sparčiai plėtojami.

Čia pateiktieji pavyzdžiai rodo, kad esama gilios analogijos tarp daugelio sistemų kolektyvinio veikimo, kad ir kokios skirtingos kiekvienos jų savybės. Todėl sinergetika yra savotiškas tiltas, jungiantis įvairias mokslo šakas ir, ką itin verta pabrėžti, tiltas tarp tokių skirtingų mokslo šakų, kurias iš tradicijos vadiname „tiksliosiomis" ir „netiksliosiomis". Todėl galime tikėtis, kad ši jauna mokslo šaka pasieks daug įdomių rezultatų.

NOBELIO PREMIJOS UŽ FIZIKOS TYRIMUS LAUREATAI (1965—1983)

1965 S. Tomonaga (Tomonaga), J. Švingeris (Schwinger), R. Feinmanas (Feynman) už fundamentalų indėlį į kvantinę elektrodinamiką, svarbų elementariųjų dalelių fizikai.
1966 A. Kastleris (Kastler) už optinių metodų garso diapazono svyravimams atomuose tirti atradimą ir tobulinimą.
1967 H. Bėtė (Bethe) už indėlį į branduolinių reakcijų teoriją, ypač už termobranduolinių reakcijų, kurios yra žvaigždžių energijos šaltinis, ciklo atradimą.
1968 L. Alvaras (Alvarez) už indėlį į elementariųjų dalelių fiziką, svarbiausia,— už daugelio rezonansų atradimą.
1969 M. Gelis-Manas (Gell-Mann) už atradimus, susijusius su elementariųjų dalelių klasifikacija ir jų sąveikomis.
1970 H. Alfvenas (Alfven) už fundamentalius magnetinės hidrodinamikos tyrimus ir jos taikymus plazmos fizikoje. L. Nejelis (Néel) už fundamentalius antiferomagnetizmo ir feromagnetizmo tyrimus, kurių rezultatai plačiai taikomi kietojo kūno fizikoje.
1971 D. Gaboras (Gabor) už holografijos sukūrimą.
1972 Dž. Bardynas (Bardeen), L. Kuperis (Cooper), Dž. Šryferis (Schrieffer) už superlaidumo teorijos sukūrimą.
1973 L. Esakis (Esaki), A. Živeras (Giaver), B. Džozefsonas (Josephson) už atradimus, susijusius su tuneliniais reiškiniais kietuosiuose kūnuose.
1974 M. Reilis (Rayleigh) už pionieriškus astronomijos tyrimus, ypač apertūrinės analizės srityje. E. Hjūišas (Hewish) už pulsarų atradimą.
1975 O. Boras (Bohr), B. Motelsonas (Mothelson), Dž. Reinvoteris (Rainwater) už ryšio tarp kolektyvinio judėjimo ir dalelių judėjimo atomų branduolyje atradimą ir remiantis tuo ryšiu išplėtotą atomo branduolio struktūros teoriją.
1976 B. Richteris (Richter), S. Tingas (Ting) už psi dalelių atradimą.
1977 F. Andersonas (Anderson), N. Motas (Mott), Dž. Van Flekas (Van Vlek) už fundamentalius teorinius magnetinių ir netvarkiųjų sistemų elektroninės struktūros tyrimus.
1978 P. Kapica už žemų temperatūrų fizikos atradimus.
R. Vilsonas (Wilson), A. Penzijas (Penzias) už reliktinio spinduliavimo atradimą.

1979 S. Vainbergas (Weinberg), Š. Glėšou (Glashow), A. Salamas (Salam) už esminį indėlį į teorijos, jungiančios silpnąsias ir elektromagnetines sąveikas, sukūrimą.

1980 Dž. Kroninas (Cronin), V. Fičas (Fitch) už simetrijos principų pažeidimo, skylant neutraliems k mezonams, atradimą.

1981 A. Šavlovas (Shawlow) už indėlį į lazerinės spektroskopijos išvystymą, N. Blombergenas (Bloembergen), K. Zygbanas (Siegbahn) už indėlį į elektronų spektroskopiją.

1982 K. Vilsonas (Wilson) už kritinių reiškinių teorijos sukūrimą.

1983 S. Čandrasekaras (Chandrasekhar) už žvaigždžių sandaros ir evoliucijos tyrimus.

V. Fauleris (Fowler) už branduolinių reakcijų žvaigždėse tyrimus ir cheminių elementų susidarymo Visatoje teoriją.